



**MARISA ISABEL  
AZEVEDO DE  
ALMEIDA  
FERNANDES**

**DESEMPENHO AMBIENTAL DE PRODUTOS NO  
SECTOR CERÂMICO EM PORTUGAL**



**MARISA ISABEL  
AZEVEDO DE  
ALMEIDA  
FERNANDES**

**DESEMPENHO AMBIENTAL DE PRODUTOS NO  
SECTOR CERÂMICO EM PORTUGAL**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Ciências e Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Doutor Luís Manuel Guerreiro Alves Arroja, Professor Associado Convidado com Agregação do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro e da Doutora Ana Cláudia Relvas Vieira Dias, Equiparada a Investigadora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus filhos Diogo Alexandre e Tiago Alexandre, ao meu marido Abel Alexandre, à minha mãe Maria da Luz Novo e à minha irmã Ana Paula.

À memória de meu pai António Martins de Almeida e dos meus avós que permanecem eternamente no meu coração.

## **o júri**

Presidente / Chairman:

Doutora **Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda**,  
Professora Catedrática da Universidade de Aveiro

Vogais / Other members

Doutor **Luis Manuel Bragança Miranda Lopes**,  
Professor Associado, Universidade do Minho

Doutor **Manuel Guilherme Caras Altas Duarte Pinheiro**,  
Professor Auxiliar Com Agregação, Universidade de Lisboa

Doutor **Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira**,  
Professor Catedrático, Universidade de Aveiro

Doutor **Luís Manuel Guerreiro Alves Arroja**,  
Professor Associado Convidado C/ Agregação Aposentado, Universidade de Aveiro  
(Orientador/Supervisor)

## **agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que me apoiaram durante a realização do trabalho da tese de doutoramento.

Um agradecimento especial aos meus orientadores Professor Luís Arroja e doutora Ana Cláudia Dias pelo relevante e decisivo suporte científico, orientação, sugestões, e discussões frutuosas ao longo do trabalho.

Queria agradecer ainda às inúmeras empresas de cerâmica nomeadamente de fabrico de tijolo, telha, pavimento e revestimento envolvidas nesta investigação pelo suporte, disponibilidade de dados, acesso às instalações para medições, bem como à associação sectorial APICER – Associação portuguesa das indústrias de cerâmica e de cristalaria.

Ao Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, pelo apoio financeiro de grande parte do doutoramento, nomeadamente ao Conselho de Administração e aos Diretores Gerais particularmente Eng. Vaz Serra e Sousa, Eng. Alcântara Gonçalves, Doutor Paulo Ventura e Eng. Baio Dias. A todos os colegas do CTCV o meu apreço.

E, por fim, mas não menos importante, a todos os meus familiares, amigos e colegas que me apoiaram ao longo deste percurso académico, pelas palavras de motivação, incentivo particularmente nos momentos mais difíceis, que tanto ajudaram a transpor os obstáculos e envidar esforços para a conclusão deste estudo. Uma palavra de apreço aos meus colegas e amigos João Barata, Pedro Frade, Anabela Amado, Gonçalo Felgueiras, Francisco Silva, Susana Cardoso Pereira, Paula Quinteiro, Céu Vieira, Margarida Reis e Gabriela Santos pelo apoio, incentivo e carinho dedicado ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus filhos, ao meu marido, à minha mãe e irmã pelo incansável apoio.

A todos o meu agradecimento!

## palavras-chave

Avaliação de ciclo de vida, declaração ambiental de produto, impactes ambientais; pavimento e revestimento, produtos cerâmicos, telha, tijolo, sustentabilidade

## resumo

A cerâmica é um sector tradicional em Portugal, cujos produtos são dos mais antigos e ubíquos, sendo utilizados para diversas finalidades das quais se destaca o uso na fileira da construção/habitat. Os materiais cerâmicos são caracterizados por serem consumidores intensivos de energia e outros recursos, e gerarem impactes ambientais, pelo que o conhecimento do seu desempenho ambiental é fundamental para a sua melhoria e para a promoção de uma economia mais circular e uma construção mais sustentável.

Esta tese tem como objetivo avaliar os impactes ambientais ao longo do ciclo de vida de materiais cerâmicos utilizados na construção nacional, nomeadamente tijolo, telha e ladrilhos (pavimento e revestimento), tendo em vista a melhoria do seu desempenho ambiental.

O trabalho é desenvolvido e implementado recorrendo à metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV), numa abordagem do berço ao túmulo, aplicada a vários estudos de caso, a fim de investigar etapas e processos mais influentes do ponto de vista ambiental. São ainda investigadas questões e variáveis tecnológicas, metodológicas e temporais que poderão influenciar o desempenho ambiental desta tipologia de produtos cerâmicos, bem como cenários com medidas de melhoria de desempenho.

A presente tese destaca a etapa do berço ao portão como a mais relevante para os materiais cerâmicos em estudo para a grande maioria das categorias de impacto ambiental analisadas, dando relevância ao processo da cozedura, nomeadamente para as categorias mais associadas a poluentes oriundos da combustão. Os impactes ambientais determinados para o tijolo registam alterações significativas em função do tipo de combustível (biomassa, coque de petróleo, gás natural ou mista), enquanto na telha é o tipo de enforna na cozedura (existência ou não de mobília refratária) e a presença de sistemas de tratamento de efluentes gasosos que mais influenciam os impactes. Já nos ladrilhos, as variáveis mais críticas são a espessura do material, tipologia de matérias-primas (e sua origem), tipologia de produto final, modo de conformação (prensado vs extrudido), quantidade de vidrado e tratamento subsequente.

A implementação de instrumentos e políticas europeias conduz à melhoria do desempenho ambiental dos ladrilhos em estudo, sendo o rótulo ecológico a mais eficaz. A redução de distâncias rodoviárias (substituição de matérias-primas estrangeiras por nacionais) é também eficiente. Já para o tijolo e a telha, as medidas de promoção da eficiência energética são as mais eficazes na diminuição dos impactes ambientais. É de destacar ainda que a definição de médias e de melhores desempenhos ambientais (“benchmarks”) deve ser cuidada e específica por tipologia de material cerâmico pois esta condiciona os impactes ambientais determinados.

## **keywords**

Brick, ceramic products, environmental impacts, environmental product declaration, life cycle assessment, rooftile, sustainability; wall and floor tiles.

## **abstract**

The ceramic industry is a traditional sector in Portugal, whose products are one of the oldest and most ubiquitous, being used for several purposes, including the use in the construction sector. Ceramic materials are energy and resources intensive consumers, and generate several environmental impacts. Thus, knowing their environmental performance is fundamental for their improvement and for the promotion of a more circular economy and sustainable construction. This thesis aims to evaluate the environmental impacts throughout the entire life cycle of ceramic materials used in the national construction, namely brick, roof tile and wall and floor tiles, in order to improve its environmental performance.

This work is developed and implemented by using Life Cycle Assessment (LCA) methodology, in a "cradle-to-grave" approach, applied to several case studies in order to investigate more influential stages and processes from the environmental point of view. Some technological, methodological and temporal variables that may influence the environmental performance of this type of ceramic materials are also investigated, as well as scenarios with environmental improvement measures.

The present thesis shows that the "cradle to gate" stage is the most relevant for the ceramic materials under study, for the great majority of environmental impact categories analyzed, giving relevance to the firing process, namely for the categories most associated to pollutants from combustion. The environmental impacts determined for bricks show significant changes depending on the type of fuel (biomass, petroleum coke, natural gas or mixed), while for roof tiles, the impacts are mostly affected by the existence (or not) of refractory furniture for the kiln and the presence of gaseous emissions treatment systems. For wall and floor tiles, the most critical variables are the thickness of the material, type of raw material (and its origin), type of final product, mode of conformation (pressed vs. extruded), amount of glaze and subsequent treatment.

The implementation of European instruments and policies leads to improved environmental performance of the tiles under study, with the eco-label being the most effective. The reduction of road distances (replacement of foreign raw materials by national ones) is also efficient. For brick and roof tile, measures to promote energy efficiency are the most effective in reducing the environmental impacts. It should also be noted that the definition of environmental impact averages and benchmarks should be specific to the type of ceramic material because it determines distinct environmental impacts.

# Índice

<b>Índice .....</b>	<b>i</b>
<b>Índice de tabelas .....</b>	<b>v</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de acrónimos, siglas, símbolos e nomenclatura .....</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e fatores de motivação .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Estrutura da dissertação .....	5
1.4 Contributos decorrentes dos trabalhos da tese .....	6
<b>2 A Indústria Cerâmica – Breve Caracterização.....</b>	<b>7</b>
2.1 O sector em números .....	8
2.1.1 Tijolos e telhas cerâmicas .....	9
2.1.2 Pavimento e revestimento .....	11
2.2 Breve descrição geral do processo de fabrico .....	13
<b>3 Estado da arte .....</b>	<b>19</b>
3.1 Avaliação do ciclo de vida .....	19
3.1.1 Contexto e evolução histórica .....	19
3.1.2 Metodologia da ACV .....	22
3.1.2.1 Definição do objetivo e âmbito .....	23
3.1.2.2 Inventário do ciclo de vida .....	23
3.1.2.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida .....	24
3.1.2.4 Interpretação do ciclo de vida .....	26
3.1.3 Rotulagem ambiental .....	27
3.1.3.1 Declarações ambientais do tipo I – rótulos ambientais .....	30
3.1.3.2 Declarações ambientais do tipo II – auto-declarações .....	31
3.1.3.3 Declarações ambientais do tipo III – declarações ambientais de produto .....	32
3.1.4 Pegada ambiental do produto .....	36



3.2	Estudos de ACV em materiais cerâmicos utilizados na construção .....	39
3.2.1	Tijolo cerâmico .....	40
3.2.2	Telha cerâmica .....	48
3.2.3	Ladrilhos cerâmicos.....	53
<b>4</b>	<b>Estudos de caso: ACV em produtos de cerâmica para construção.....</b>	<b>63</b>
4.1	Tijolos cerâmicos .....	63
4.1.1	Descrição do produto.....	64
4.1.2	Metodologia .....	64
4.1.2.1	Definição de objetivo e âmbito .....	64
4.1.2.2	Unidade funcional e unidade declarada .....	65
4.1.2.3	Fronteiras do sistema .....	65
4.1.2.4	Inventário de ciclo de vida.....	71
4.1.2.5	Avaliação de impactes ambientais .....	75
4.1.3	Resultados e discussão.....	78
4.1.3.1	Abordagem do berço ao túmulo .....	78
4.1.3.2	Abordagem do berço ao portão .....	86
4.1.3.3	Comparação e discussão com outros estudos.....	95
4.1.3.4	Análise de sensibilidade .....	98
4.1.3.5	Potenciais medidas de melhoria do impacte ambiental.....	103
4.1.4	Conclusão .....	105
4.2	Telha cerâmica.....	107
4.2.1	Descrição do produto.....	107
4.2.2	Metodologia de ACV aplicada à telha cerâmica .....	107
4.2.2.1	Definição de objetivo e âmbito .....	107
4.2.2.2	Unidade funcional .....	108
4.2.2.3	Fronteiras do sistema .....	108
4.2.2.4	Inventário do ciclo de vida.....	113
4.2.2.5	Avaliação de impactes ambientais .....	121
4.2.3	Resultados e discussão.....	122
4.2.3.1	Abordagem do berço ao túmulo .....	122
4.2.3.2	Abordagem do berço ao portão .....	129
4.2.3.3	Potenciais medidas de melhoria do impacte ambiental.....	139
4.2.3.4	Comparação e discussão com outros estudos.....	141
4.2.4	Conclusão .....	143

<b>4.3</b>	<b>Ladrilhos Cerâmicos - pavimento .....</b>	<b>145</b>
4.3.1	Descrição do produto – ladrilho cerâmico .....	145
4.3.2	Metodologia de ACV aplicada ao pavimento cerâmico.....	145
4.3.2.1	Definição de objetivo e âmbito .....	145
4.3.2.2	Unidade funcional .....	147
4.3.2.3	Fronteiras do sistema .....	148
4.3.2.4	Inventário do ciclo de vida .....	154
4.3.2.5	Avaliação de impactes ambientais .....	160
4.3.3	Resultados e discussão .....	161
4.3.3.1	Abordagem do berço ao túmulo .....	161
4.3.3.2	Abordagem do berço ao portão .....	169
4.3.3.3	Comparação e discussão com outros estudos .....	180
4.3.3.4	Potenciais medidas de melhoria do impacte ambiental .....	187
4.3.4	Conclusão .....	193
<b>4.4</b>	<b>Ladrilhos cerâmicos - revestimento.....</b>	<b>195</b>
4.4.1	Metodologia de ACV.....	195
4.4.1.1	Definição de objetivo e âmbito .....	195
4.4.1.2	Unidade funcional .....	196
4.4.1.3	Fronteiras do sistema .....	197
4.4.1.4	Inventário do ciclo de vida .....	198
4.4.1.5	Avaliação de impactes ambientais .....	205
4.4.2	Resultados e discussão .....	205
4.4.2.1	Abordagem do berço ao túmulo .....	205
4.4.2.2	Abordagem do berço ao portão.....	213
4.4.2.3	Comparação e discussão com outros estudos .....	223
4.4.2.4	Potenciais medidas de melhoria do impacte ambiental .....	226
4.4.3	Conclusão .....	228
<b>5</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>231</b>
5.1	Conclusões gerais.....	231
5.2	Sugestões para melhoria do desempenho ambiental dos produtos cerâmicos	234
5.3	Recomendações.....	235
5.4	Limitações e perspectivas para trabalhos futuros .....	236
<b>6</b>	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>239</b>

<b>Anexos .....</b>	<b>A.1</b>
Anexo A.1 - Lista de publicações completa decorrente dos trabalhos desenvolvidos na tese .....	A.3
Anexo A.2 - Operadores de programa. Caso do DAPHabitat .....	A.7
Anexo A.3 – Impacte ambiental dos produtos cerâmicos em estudo .....	A.11

## Índice de tabelas

Tabela 1 – Produção por tipo de produto de acordo com o CAE (fonte: INE, 2017).....	12
Tabela 2 – Quadro comparativo dos três tipos de rótulos e declarações ambientais (adaptado de projeto InediC (Almeida, 2011)).....	30
Tabela 3 – Diferentes Tipologias de DAP de acordo com os módulos de informação incluídos (fonte: adaptado da EN 15804+A1:2013 e DAPHabitat, 2013) .....	34
Tabela 4 – Categorias de impacto, indicadores de categoria de impacto e modelos de avaliação do impacto para os estudos sobre a PAP (fonte: RC n.º 2013/179/UE).....	38
Tabela 5 – Características dos estudos de ACV a tijolo cerâmico considerados na revisão bibliográfica .....	41
Tabela 6 – Características dos estudos de ACV a telhas cerâmicas considerados na revisão bibliográfica ....	49
Tabela 7 – Revisão bibliográfica de vários estudos de ACV a ladrilhos cerâmicos (fonte: adaptado de Almeida et al., 2016 e Rós-Dosdá et al., 2017) .....	54
Tabela 8 – Características técnicas do tijolo de 11.....	65
Tabela 9 – Fontes de dados utilizados para a fase de recolha de inventário do tijolo.....	72
Tabela 10 – Dados de inventário para a etapa de produto (A1 a A3) de 1 m <sup>2</sup> de tijolo (entradas) .....	73
Tabela 11 – Dados de inventário para a etapa de produto (A1 a A3) de 1 m <sup>2</sup> de tijolo (saídas).....	74
Tabela 12 – Categorias de impacto, parâmetro, unidade, métodos e referências bibliográficas .....	77
Tabela 13 – Impacte potencial da parede de tijolo cerâmico dados 2008 (Fonte: Almeida et al., 2015b) .....	85
Tabela 14 – Contributo das infraestruturas na abordagem do berço ao portão do tijolo (%).....	94
Tabela 15 – Comparação de resultados de vários estudos com tijolo cerâmico.....	96
Tabela 16 – Percentagem de redução alcançada por unidade funcional (1 m <sup>2</sup> ) para reciclagem do material cerâmico no fim de vida .....	99
Tabela 17 – Dados de massa e preço num raio de 100 e 200 km por tipologia de tijolo cerâmico .....	100
Tabela 18 – Percentagem de redução alcançada por unidade funcional (1 m <sup>2</sup> ) para cada cenário .....	102
Tabela 19 – Percentagem de redução alcançada por 1 m <sup>2</sup> de parede de tijolo cerâmico .....	104
Tabela 20 – Fontes de dados utilizados para a fase de ICV da telha .....	114
Tabela 21 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m <sup>2</sup> de telha T1 (entradas) .....	115
Tabela 22 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m <sup>2</sup> de telha T1 (saídas).....	116
Tabela 23 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m <sup>2</sup> de telha T2 (entradas) .....	117
Tabela 24 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m <sup>2</sup> de telha T2 (“saídas”) .....	118
Tabela 25 – Contributo das infraestruturas na abordagem do berço ao portão da telha T1 (%) .....	138
Tabela 26 – Contributo das infraestruturas na abordagem do berço ao portão da telha T2 (%) .....	138
Tabela 27 - Percentagem de redução alcançada na telha por unidade funcional (1 m <sup>2</sup> ).....	140

Tabela 28 – Impactes ambientais de telha na Alemanha, Espanha, Itália, Bélgica e Brasil .....	141
Tabela 29 – Comparação de impactes ambientais por m <sup>2</sup> segundo o IMPACT2002+ .....	142
Tabela 30 – Peso específico do material de pavimento cerâmico .....	148
Tabela 31 – Fontes de dados utilizados para a fase de recolha de inventário do ladrilho .....	155
Tabela 32 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m <sup>2</sup> de pavimento (entradas).....	156
Tabela 33 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m <sup>2</sup> de pavimento (“saídas”).....	158
Tabela 34 – Distribuição percentual do consumo de energia (gás natural) no processo na fábrica de pavimento (A3).....	159
Tabela 35 – Contributo das infraestruturas (produção de bens capitais na abordagem do berço ao portão do pavimento) (%).....	180
Tabela 36 – Comparação de impactes ambientais por unidade funcional (1 m <sup>2</sup> de ladrilho) com outros publicados na bibliografia .....	181
Tabela 37 – Comparação de impactes ambientais por unidade funcional (1 m <sup>2</sup> de ladrilho) publicado em DAPs de ladrilho .....	182
Tabela 38 – Valores de desempenho ambiental mínimos estipulados no rótulo ecológico para o processo de cozedura utilizados na medida IA7 .....	190
Tabela 39 – Ações de melhoria (IA), custos de investimento, poupanças anuais e payback.....	190
Tabela 40 – Percentagem de redução alcançada por unidade funcional (1 m <sup>2</sup> ).....	191
Tabela 41 – Peso específico do material de revestimento cerâmico .....	197
Tabela 42 – Dados de inventário para a produção de 1 m <sup>2</sup> de revestimento (entradas) .....	199
Tabela 43 – Dados de inventário para a produção de 1 m <sup>2</sup> de revestimento (“saídas”) .....	200
Tabela 44 – Distribuição percentual do consumo de energia (gás natural) no processo na fábrica (A3) para revestimento .....	202
Tabela 45 – Contributo das infraestruturas (produção de bens capitais na abordagem do berço ao portão do revestimento) (%) .....	223
Tabela 46 - Percentagem de redução alcançada por unidade funcional (1 m <sup>2</sup> ) .....	227
Tabela A. 1 – Impacte potencial associado a 1 m <sup>2</sup> de parede de tijolo cerâmico do berço ao túmulo .....	A.11
Tabela A. 2 - Impacte potencial associado a 1 m <sup>2</sup> de parede de tijolo cerâmico do berço ao portão .....	A.12
Tabela A. 3 – Impacte potencial associado a 1 kg de parede de tijolo cerâmico do berço ao túmulo .....	A.13
Tabela A. 4 – Impacte potencial associado a 1 kg de parede de tijolo cerâmico do berço ao portão .....	A.14
Tabela A. 5 – Impacte potencial associado a 1 m <sup>2</sup> de telha cerâmica T1 do berço ao túmulo .....	A.15
Tabela A. 6 – Impacte potencial associado a 1 m <sup>2</sup> de telha cerâmica T2 do berço ao túmulo .....	A.16
Tabela A. 7 – Impacte potencial associado a 1 kg de telha cerâmica T1 do berço ao túmulo .....	A.17
Tabela A. 8 – Impacte potencial associado a 1 kg de telha cerâmica T2 do berço ao túmulo .....	A.18
Tabela A. 9 – Impacte potencial associado a 1 m <sup>2</sup> de telha cerâmica T1 do berço ao portão .....	A.19

Tabela A. 10 – Impacte potencial associado a 1 m <sup>2</sup> de telha cerâmica T2 do berço ao portão .....	A.20
Tabela A. 11 – Impacte potencial associado a 1 kg de telha cerâmica T1 do berço ao portão .....	A.21
Tabela A. 12 – Impacte potencial associado a 1 kg de telha cerâmica T2 do berço ao portão .....	A.22
Tabela A. 13 – Impacte potencial associado a 1 m <sup>2</sup> de pavimento cerâmico do berço ao túmulo .....	A.23
Tabela A. 14 – Impacte potencial associado a 1 kg de pavimento cerâmico do berço ao túmulo.....	A.24
Tabela A. 15 – Impacte potencial associado a 1 m <sup>2</sup> de pavimento cerâmico do berço ao portão.....	A.25
Tabela A. 16 – Impacte potencial associado a 1 kg de pavimento cerâmico do berço ao portão .....	A.26
Tabela A. 17 – Impacte potencial associado a 1 m <sup>2</sup> de revestimento cerâmico do berço ao túmulo.....	A.27
Tabela A. 18 – Impacte potencial associado a 1 kg de revestimento cerâmico do berço ao túmulo .....	A.28
Tabela A. 19 – Impacte potencial associado a 1 m <sup>2</sup> de revestimento cerâmico do berço ao portão .....	A.29
Tabela A. 20 – Impacte potencial associado a 1 kg de revestimento cerâmico do berço ao portão .....	A.30

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## Índice de figuras

Figura 1 – Variáveis em análise nos estudos de caso .....	4
Figura 2 – Subsectores da indústria cerâmica (adaptado de Fernandes et al. (2004)) .....	7
Figura 3 – Valores da produção (milhões €) dos subsectores da cerâmica da UE-28 (fonte: Eurostat, 2017)..	8
Figura 4 – Evolução da produção de tijolo cerâmico (2000 a 2015) (baseado no Eurostat e no peso médio nacional do tijolo).....	10
Figura 5 – Evolução da produção de telha cerâmica (2000 a 2015) (baseado no Eurostat e peso médio nacional da telha) .....	10
Figura 6 – Principais tecnologias de fabrico de pavimento e revestimento (Fonte: adaptado de Fernandes et al, (2004)) .....	12
Figura 7 – Ciclo de vida de um material cerâmico de construção.....	13
Figura 8 – Principais fases do processo de fabrico cerâmico (adaptado de Serrano et al. (2007) e European Commission (2007)).....	14
Figura 9 – Fases de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) (adaptado da norma EN ISO 14040, 2006).....	22
Figura 10 – Elementos obrigatórios e opcionais da fase de avaliação de impacte ambiental, segundo a norma ISO 14044 .....	26
Figura 11 – Fronteiras do sistema da parede de tijolo cerâmico .....	66
Figura 12 – Fluxograma de fabrico do tijolo cerâmico com identificação de principais aspetos ambientais .	68
Figura 13 – Contributo de cada etapa para o aquecimento global (GWP) por m <sup>2</sup> de parede tijolo .....	78
Figura 14 – Contributo de cada etapa para a acidificação (AP) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	79
Figura 15 – Contributo de cada etapa para a eutrofização (EP) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	79
Figura 16 – Contributo de cada etapa para a depleção da camada de ozono (ODP) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	79
Figura 17 – Contribuição de cada etapa para a oxidação fotoquímica (POCP) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo ....	80
Figura 18 – Contribuição de cada etapa para a depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	80
Figura 19 – Contribuição de cada etapa para a depleção de recursos – fósseis (ADf) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	80
Figura 20 – Contribuição de cada etapa para a toxicidade humana – cancerígena (HTc) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	81
Figura 21 – Contribuição de cada etapa para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	81
Figura 22 – Contribuição de cada etapa para partículas (PM2.5) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	81
Figura 23 – Contribuição de cada etapa para uso do solo (LU) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	82



Figura 24 – Contribuição de cada etapa para depleção da água (WD) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	82
Figura 25 – Contribuição de cada etapa para ecotoxicidade (ET) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	82
Figura 26 – Contribuição de cada etapa para acidificação pelo método ILCD (AP+) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	83
Figura 27 – Contribuição de cada etapa para oxidação fotoquímica pelo método ILCD (POCP+) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	83
Figura 28 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para o GWP por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	87
Figura 29 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a AP por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	87
Figura 30 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a EP por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	87
Figura 31 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a ODP por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	88
Figura 32 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a POCP por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	88
Figura 33 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a ADe por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	88
Figura 34 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a ADf por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	89
Figura 35 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a HTc por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	89
Figura 36 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a HTnc por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	89
Figura 37 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para PM2.5 por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	90
Figura 38 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para o LU por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	90
Figura 39 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a WD por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	90
Figura 40 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a ET por m <sup>2</sup> de parede de tijolo.....	91
Figura 41 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a AP+ (ILCD) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo...	91
Figura 42 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a POCP+(ILCD) por m <sup>2</sup> de parede de tijolo .....	91
Figura 43 – Fronteiras do sistema da telha cerâmica .....	109
Figura 44 – Fluxograma de fabrico da telha cerâmica com identificação de principais aspetos ambientais	112
Figura 45 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para o aquecimento global (GWP) por m <sup>2</sup> de telha.	123
Figura 46 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a acidificação (AP) por m <sup>2</sup> de telha.....	123
Figura 47 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a eutrofização (EP) por m <sup>2</sup> de telha.....	123
Figura 48 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a depleção da camada de ozono (ODP) por m <sup>2</sup> de telha .....	124
Figura 49 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a Oxidação fotoquímica (POCP) por m <sup>2</sup> de telha .....	124
Figura 50 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por m <sup>2</sup> de telha .....	124
Figura 51 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a Depleção de recursos – fósseis (ADf) por m <sup>2</sup> de telha .....	125

Figura 52 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – cancerígena (HTc) por m <sup>2</sup> de telha.....	125
Figura 53 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m <sup>2</sup> de telha.....	125
Figura 54 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para partículas (PM2.5) por m <sup>2</sup> de telha .....	126
Figura 55 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para uso do solo (LU) por m <sup>2</sup> de telha.....	126
Figura 56 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para depleção da água (WD) por m <sup>2</sup> de telha .....	126
Figura 57 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para ecotoxicidade (ET) por m <sup>2</sup> de telha .....	127
Figura 58 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para acidificação pelo método ILCD (AP+) por m <sup>2</sup> de telha.....	127
Figura 59 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para oxidação fotoquímica pelo método ILCD (POCP+) por m <sup>2</sup> de telha .....	127
Figura 60 – Contributo de cada processo (etapa A1-A3) para o aquecimento global (GWP) por m <sup>2</sup> de telha .....	130
Figura 61 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a acidificação (AP) por m <sup>2</sup> de telha .....	130
Figura 62 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a eutrofização (EP) por m <sup>2</sup> de telha .....	131
Figura 63 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a camada de ozono (ODP) por m <sup>2</sup> de telha .....	131
Figura 64 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a oxidação fotoquímica (POCP) por m <sup>2</sup> de telha .....	131
Figura 65 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a depleção de recursos – fósseis (ADf) por m <sup>2</sup> de telha.....	132
Figura 66 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por m <sup>2</sup> de telha .....	132
Figura 67 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – cancerígeno (HTc) por m <sup>2</sup> de telha.....	132
Figura 68 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m <sup>2</sup> de telha .....	133
Figura 69 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para partículas (PM2.5) por m <sup>2</sup> de telha.....	133
Figura 70 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para uso do solo (LU) por m <sup>2</sup> de telha .....	133
Figura 71 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para depleção da água (WD) por m <sup>2</sup> de telha..	134
Figura 72 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para ecotoxicidade (ET) por m <sup>2</sup> de telha.....	134
Figura 73 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para acidificação pelo método ILCD (AP+) por m <sup>2</sup> de telha.....	134
Figura 74 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para Oxidação fotoquímica pelo método ILCD (POCP+) por m <sup>2</sup> de telha .....	135
Figura 75 – Fronteiras do sistema de ladrilho cerâmico .....	149

Figura 76 – Fluxograma de fabrico do ladrilho cerâmico com identificação de principais aspetos ambientais .....	152
Figura 77 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para o aquecimento global (GWP) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	161
Figura 78 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a acidificação (AP) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	162
Figura 79 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a eutrofização (EP) por m <sup>2</sup> de pavimento ....	162
Figura 80 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a depleção da camada de ozono (ODP) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	162
Figura 81 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a oxidação fotoquímica (POCP) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	163
Figura 82 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	163
Figura 83 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a depleção de recursos – fósseis (ADf) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	163
Figura 84 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – cancerígeno (HTc) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	164
Figura 85 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	164
Figura 86 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para partículas (PM2.5) por m <sup>2</sup> de pavimento ....	164
Figura 87 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para uso do solo (LU) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	165
Figura 88 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a depleção da água (WD) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	165
Figura 89 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para ecotoxicidade (ET) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	165
Figura 90 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para acidificação pelo método estipulado pelo ILCD (AP+) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	166
Figura 91 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para oxidação fotoquímica pelo método estipulado pelo ILCD (POCP+) por m <sup>2</sup> de pavimento .....	166
Figura 92 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para o aquecimento global (GWP) por m <sup>2</sup> ....	170
Figura 93 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a acidificação (AP) por m <sup>2</sup> .....	171
Figura 94 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a eutrofização (EP) por m <sup>2</sup> .....	171
Figura 95 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a camada de ozono (ODP) por m <sup>2</sup> .....	171
Figura 96 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a oxidação fotoquímica (POFP) por m <sup>2</sup> .....	172
Figura 97 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a depleção de recursos – fósseis (ADf) por m <sup>2</sup> .....	172
Figura 98 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por m <sup>2</sup> .....	172
Figura 99 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – cancerígeno (HTc) por m <sup>2</sup> .....	173

Figura 100 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m <sup>2</sup> .....	173
Figura 101 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para partículas (PM2.5) por m <sup>2</sup> .....	173
Figura 102 – Contribuição de cada processo da etapa A1-A3) para uso do solo (LU) por m <sup>2</sup> .....	174
Figura 103 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para depleção da água (WD) por m <sup>2</sup> .....	174
Figura 104 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para ecotoxicidade (ET) por m <sup>2</sup> .....	174
Figura 105 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para acidificação pelo método estipulado pelo ILCD (AP+) por m <sup>2</sup> .....	175
Figura 106 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para Oxidação fotoquímica pelo método estipulado pelo ILCD (POCP+) por m <sup>2</sup> .....	175
Figura 107 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para o aquecimento global (GWP) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	206
Figura 108 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a acidificação (AP) por m <sup>2</sup> de revestimento	206
Figura 109 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a eutrofização (EP) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	206
Figura 110 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a depleção da camada de ozono (ODP) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	207
Figura 111 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a Oxidação fotoquímica (POCP) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	207
Figura 112 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	207
Figura 113 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a Depleção de recursos – fósseis (ADf) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	208
Figura 114 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – cancerígeno (HTc) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	208
Figura 115 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	208
Figura 116 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para partículas (PM2.5) por m <sup>2</sup> de revestimento	209
Figura 117 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para uso do solo (LU) por m <sup>2</sup> de revestimento ..	209
Figura 118 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para depleção da água (WD) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	209
Figura 119 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para ecotoxicidade (ET) por m <sup>2</sup> de revestimento	210
Figura 120 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para acidificação pelo método estipulado pelo ILCD (AP+) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	210
Figura 121 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para oxidação fotoquímica pelo método estipulado pelo ILCD (POCP+) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	210
Figura 122 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para o aquecimento global (GWP) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	214

Figura 123 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a acidificação (AP) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	214
Figura 124 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a eutrofização (EP) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	215
Figura 125 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a camada de ozono (ODP) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	215
Figura 126 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a oxidação fotoquímica (POCP) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	215
Figura 127 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a depleção de recursos – fósseis (ADf) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	216
Figura 128 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	216
Figura 129 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – cancerígeno (HTc) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	216
Figura 130 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	217
Figura 131 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para partículas (PM2.5) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	217
Figura 132 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para uso do solo (LU) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	217
Figura 133 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para depleção da água (WD) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	218
Figura 134 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para ecotoxicidade (ET) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	218
Figura 135 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para acidificação pelo método estipulado pelo ILCD (AP+) por m <sup>2</sup> de revestimento.....	218
Figura 136 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para Oxidação fotoquímica pelo método estipulado pelo ILCD (POCP+) por m <sup>2</sup> de revestimento .....	219
 Figura A. 1 – Alguns exemplos de Programas de registo de DAP's (adaptado de Anderson et al., 2012) .....	A.7

## Lista de acrónimos, siglas, símbolos e nomenclatura

ACV	Avaliação de ciclo de vida
AICV	Avaliação de impacte do ciclo de vida
AFNOR	Associação Francesa de Normalização e Certificação
APICER	Associação Portuguesa das Indústrias de Cerâmica e de Cristalaria
As	Arsénio
BREFs	Best available techniques Reference document (Documentos de Referência sobre Melhores Técnicas Disponíveis)
CAE	Classificação Portuguesa das Atividades Económicas
CED	Cumulative Energy Demand
CEN	Comité Europeu de Normalização
CFC's	Clorofluorcarbonos
CBO5	Carência bioquímica de oxigénio
Cd	Cádmio
CH4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO2	Dióxido de carbono
CO2 eq	Dióxido de carbono equivalente
COV	Compostos orgânicos voláteis
COVNM	Compostos orgânicos voláteis não metânicos
CQO	Carência química de oxigénio
Cr	Crómio
CTUe	Unidade tóxica comparativa para os ecossistemas
CTUh	Unidade tóxica comparativa para o ser humano
Cu	Cobre
DAP	Declaração Ambiental de Produtos
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
ETARI	Estação de Tratamento de Águas Residuais Industriais
EUEB	European Union Eco-Labeling Board

GEE	Gases com Efeito de Estufa
GECA	Good Environmental Choice Australia
GPL	Gás de Petróleo Liquefeito
H+	Ião hidrogénio
HCl	Ácido clorídrico
HF	Ácido fluorídrico
Hg	Mércurio
IEA	International Energy Agency
ICV	Inventário do ciclo de vida
ILCD	International Reference Life Cycle Data System (ILCD) – Sistema Internacional de Referência de Dados de Ciclo de Vida
INE	Instituto Nacional de Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	International Standard Organization - Organização Internacional de Normalização
JRC	Joint Research Centre
LCT	Life Cycle Thinking - Pensamento de Ciclo de Vida
LER	Lista Europeia de Resíduos
MIRR	Mapa Integrado de Registo de Resíduos
MP	Matéria-prima
MTD	Melhor técnica disponível
N	Azoto
NACE	Nomenclatura Geral das Atividades Económicas na Comunidade Europeia
N.A.	Não aplicável
N.D.	Não disponível ou desconhecido
Ni	Níquel
Nm <sup>3</sup>	Normal metro cúbico
NOx	Óxidos de azoto

OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Económico
P	Fósforo
Pb	Chumbo
PAO	Pegada Ambiental de Organizações
PAP	Pegada Ambiental de Produto
PEF	Product Environmental Footprint
PIB	Produto Interno Bruto
PIP	Política Integrada de Produto
PM< 10	Partículas com diâmetro inferior a 10 µm
PM> 10	Partículas com diâmetro superior a 10 µm
PM2.5	Partículas com diâmetro inferior a 2,5 µm
PME	Pequenas e Médias Empresas
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	lão fostato equivalente
PRTR	Pollutant Release and Transfer Register (Registo de Emissões e Transferências de Poluentes)
RCP	Regras para a Categoria de Produtos
RCPAP	Regras para a Categoria de Produtos no âmbito da PAP
RCPAO	Regras para a Categoria de Sector no âmbito da PAP
RCD	Resíduos de Construção e demolição
Sb	Antimónio
Sb eq	Antimónio equivalente
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry – Sociedade de Toxicidade Ambiental e Química
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre
SO <sub>2</sub> eq	Dióxido de enxofre equivalente
SO <sub>x</sub>	Óxidos de enxofre
TBE	Tiles & Bricks Europe
Tkm	tonelada-quilómetro
UE	União Europeia



UNEP	United Nations Environment Programme – Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA)
VEA	Valores de Emissão Associados ao BREF
Zn	Zinco

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento e fatores de motivação

O sector da construção tem desempenhado um papel muito ativo no desenvolvimento económico e social da população, com uma forte incidência na empregabilidade e na contribuição para o produto interno bruto (PIB). No entanto, este sector consome mais matérias-primas do que qualquer outro sector, tendo também um elevado consumo de energia (Comissão Europeia, 2011a; Koroneos and Dompros, 2007; Misiga, 2012; Ronning and Lyng, 2011). Na Europa, o sector da construção consome cerca de 40-42% da energia total e das matérias-primas (European Commission, 2014a), 30% dos recursos hídricos, emite cerca de 30-36% das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) e produz 15% dos resíduos industriais totais (Comissão Europeia, 2011a; Misiga, 2012). Na China, este sector consome mais de 40% dos materiais e é responsável por 40-50% da emissão de GEE e de gases acidificantes (S. Geng et al., 2017).

Assim, atendendo aos impactes relevantes do sector da construção e seus materiais no ambiente, ao seu longo ciclo de vida (superior a 50 anos) (Pinheiro, 2006; Torgal and Jalali, 2010), existe cada vez mais uma maior preocupação e orientação para processos de construção mais sustentáveis, com foco especial na eficiência de uso de recursos (Frej and Gottfried, 2005; Ortiz et al., 2009; Pinheiro, 2006; Rademaekers et al., 2011) bem como a utilização de materiais com menor impacte ambiental ao longo de todo o ciclo de vida, isto é, desde a extração de matérias-primas, a produção, a distribuição, a utilização até à gestão do fim de vida.

Adicionalmente também as políticas europeias se têm pautado por diversas estratégias que privilegiam a sustentabilidade e a gestão eficiente de recursos nas atividades, produtos e serviços ao longo do seu ciclo de vida, destacando-se a “Política Integrada de Produtos (PIP)” (COM n.º 2003/302) (Comissão Europeia, 2004), a “EUROPA 2020 – Estratégia para um crescimento inteligente, sustentável e inclusivo” (COM n.º 2010/2020) (Comissão Europeia, 2010a), o “Roteiro para uma Europa eficiente em recursos” (COM n.º 571/2011) (Comissão Europeia, 2011a), a Recomendação n.º 2013/179/EU (Comissão Europeia, 2013a) sobre a pegada ambiental de produto (PAP) compreendendo a utilização de métodos comuns para a medição e comunicação do desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida de produtos e organizações, e ainda a comunicação COM n.º 2014/445/EU (Comissão Europeia, 2014) sobre ganhos de eficiência na utilização dos recursos no sector da construção. Recentemente, a Comunicação da Comissão "Fechar o ciclo – plano de ação da União Europeia (UE) para a economia circular" (Comissão Europeia, 2015), incentiva uma economia circular, sustentável e inovadora e promove o Plano de Ação para a

Economia Circular, destacando entre outros o papel fundamental de informações de desempenho ambiental dos produtos ao longo do seu ciclo de vida.

Paralelamente, o Comité Europeu de Normalização (CEN) desenvolveu ainda a norma EN15804:2012+A1:2013 (CEN, 2013), que define as regras para a categoria de produtos (RCP) para materiais e obras de construção com vista ao desenvolvimento de Declaração Ambiental de Produto (DAP), mas que não se encontra totalmente harmonizada com a PAP.

Entre os materiais de construção mais comumente utilizados, Brilián et al. (2011) destacou os materiais de aço, cimento e cerâmica, apontando-os também como materiais de consumo intensivo de energia e outros recursos, e que geram impactes significativos, pelo que a melhoria do seu desempenho é fundamental para a promoção de uma construção mais sustentável. Os materiais cerâmicos, tipicamente utilizados na construção em Portugal, podem constituir até 20% a 40% dos materiais de construção de um edifício ou obra de construção e consequentemente dos resíduos de construção e demolição (RCD) (Amoêda, 2009).

A cerâmica é um sector tradicional em Portugal, sendo um dos materiais mais antigos e ubíquos face à diversidade de aplicações que oferecem. As unidades industriais produtoras de materiais cerâmicos localizam-se um pouco por todo o país, em particular nas zonas litorais, dadas as características geológicas de Portugal que apresentam um solo rico em argilas e areias em qualidade e quantidade adequadas para o fabrico destes materiais.

Em termos de contexto económico europeu, o sector cerâmico representa cerca de 28 biliões de euros (mil milhões de euros), emprega cerca de 200 mil trabalhadores e cerca de 80% das empresas são PME (pequenas e médias empresas) (Cerame-Unie, 2017). Já em Portugal, e tendo como referência o ano de 2016, o sector é composto por cerca de 370 empresas (INE, 2017), das quais 300 se encontram ativas e destas cerca de 85% são PME (APICER, 2017). Estas empresas proporcionam emprego a 15 mil trabalhadores. O respetivo volume de negócios ascende a mais de 950 milhões de euros (INE, 2017). O sector cerâmico nacional é fortemente exportador, posicionando-se no décimo primeiro lugar a nível mundial, atingindo a sexta posição a nível da União Europeia, sendo de mencionar que ocupa o quarto lugar para o subsector dos pavimentos e revestimentos não vidrados nem esmaltados a nível europeu (APICER, 2017).

Este sector industrial é caracterizado também por ser consumidor intensivo de energia, isto é consome recursos energéticos em grande quantidade, para processar os produtos que manufatura, representando os custos energéticos mais de 30% dos custos industriais (Cerame-Unie, 2017; Fernandes et al., 2004; Serrano et al., 2009). Estima-se que as emissões de GEE se situem nos 2 a 3% das emissões globais de dióxido de carbono do país.

No entanto, e apesar da relevância dos produtos cerâmicos portugueses para a construção e dos seus potenciais impactes ambientais, à data de início desta tese não existia a

quantificação do desempenho ambiental desses materiais, particularmente dos mais utilizados como o tijolo, telha, pavimentos e revestimentos, numa perspectiva de avaliação de ciclo de vida (ACV). Porém tratando-se de produtos que têm por base matérias-primas naturais, como a argila, areia, caulinos e feldspatos, com características geológicas próprias do local, processos industriais diferenciados e/ou combustíveis distintos, os mesmos justificam “de per si” a realização de uma ACV própria face aos distintos *inputs* e tecnologias.

De igual modo, importa averiguar uma série de questões e variáveis que poderão influenciar o desempenho ambiental desta tipologia de produtos cerâmicos, e que não têm sido investigadas, como sejam a tipologia de combustíveis (particularmente no fabrico de tijolo), tecnologia de enfora do material (nomeadamente na telha), tecnologia de fabrico (ciclo completo ou parcial, nomeadamente no pavimento e revestimento), tipo de matérias-primas em uso (pavimentos e revestimento), espessura do material (ladrilhos) e tratamento subsequente (particularmente nos ladrilhos). Importa ainda averiguar a influência destas variáveis no cálculo do desempenho ambiental médio dos produtos, que é adotado, por exemplo, em instrumentos como as DAPs ou na definição de benchmarks.

Adicionalmente, e de forma a convergir com instrumentos europeus como a PAP, importa avaliar detalhadamente outras categorias de impacte ambiental para além das mencionadas na EN15804+A1 (CEN, 2013), cujos impactes não estão estudados.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo geral principal desta tese é identificar e avaliar os impactes ambientais ao longo do ciclo de vida de materiais cerâmicos utilizados na construção nacional, nomeadamente o tijolo, telha e os ladrilhos (pavimento e revestimento), de forma a facilitar o processo de tomada de decisão tendo em vista melhorias no desempenho ambiental e sustentabilidade destes subsectores da indústria cerâmica, potenciando uma construção mais sustentável e circular. Para tal, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

- a) identificar e quantificar os impactes ambientais ao longo do ciclo de vida de materiais cerâmicos utilizados na construção: tijolo, telha, pavimento e revestimento, através da aplicação da ACV a diversos estudos de caso;
- b) identificar as etapas e processos mais influentes (“hotspots”) associadas ao ciclo de vida de diferentes produtos de cerâmica (extração, transporte, fabricação, distribuição, construção, utilização e fim de vida);
- c) quantificar outras categorias de impacte ambiental para além das mencionadas na EN15804+A1 (CEN, 2013) que possam ser adequadas para os materiais cerâmicos em estudo, como sejam algumas preconizadas na PAP (Comissão Europeia, 2013a), bem como analisar o uso de métodos de avaliação de impacte alternativos;

- d) analisar variáveis e parâmetros potencialmente críticos para o desempenho ambiental de materiais cerâmicos, tal como combustíveis, tipo de matéria-prima, tecnologia de enfora, espessura, tratamento subsequente, infraestruturas, etc.;
- e) analisar a evolução temporal dos impactes ambientais de materiais cerâmicos;
- f) identificar critérios de alocação para cargas ambientais para o tijolo adequados;
- g) suportar o desenvolvimento de DAPs através da identificação de escolhas metodológicas suscetíveis de afetar os resultados;
- h) identificar e sugerir áreas de melhoria do desempenho ambiental de materiais cerâmicos de construção;
- i) posicionar os resultados do desempenho ambiental dos materiais cerâmicos nacionais face aos resultados desses materiais noutros países, verificando se existem diferenças significativas;
- j) averiguar a efetividade da implementação de instrumentos e políticas europeias (ex. prevenção e controlo integrado poluição, rótulo ecológico) no desempenho ambiental dos materiais cerâmicos em estudo, contribuindo para suportar a decisão de implementação de um investimento ou melhor técnica disponível (MTD).

A abordagem metodológica para alcançar estes objetivos inclui diversas ferramentas como revisão bibliográfica, normalização existente, entrevistas a especialistas e desenvolvimento de casos de estudo múltiplos de produtos cerâmicos aplicando a ACV, contribuindo assim para a modelação de ciclo de vida. Na Figura 1 apresenta-se de forma esquemática as diversas variáveis em análise nos estudos de caso (ver Capítulo 4).

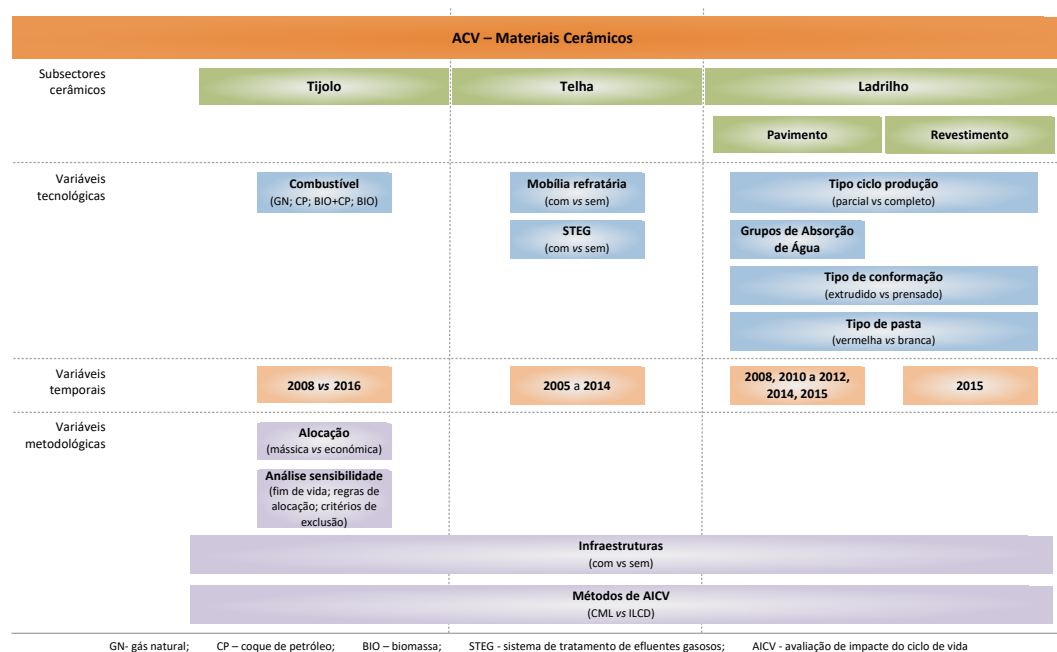


Figura 1 – Variáveis em análise nos estudos de caso

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Esta tese encontra-se organizada em 5 capítulos. No Capítulo 1 – Introdução, é explicitado o enquadramento do tema em análise, incluindo o seu contexto, fatores motivadores e antecedentes. São ainda enumerados os objetivos principais, a estrutura e abordagem metodológica genérica da tese.

No Capítulo 2 – A Indústria Cerâmica - Breve Caracterização, é efetuada uma caracterização da indústria cerâmica de forma sintética, seu contexto mundial, europeu e nacional, com especial destaque para os produtos e subsectores em estudo: tijolo, telha e ladrilhos (pavimento e revestimento). Efetua-se ainda uma breve descrição do processo de fabrico dos materiais cerâmicos.

Ao longo do Capítulo 3 – Estado da Arte, é abordado o estado do conhecimento e enunciada a metodologia seguida nesta tese. Em particular é explanada de forma sucinta a metodologia de ACV a aplicar aos materiais cerâmicos em estudo, para avaliar o desempenho ambiental desses produtos, são apresentados conceitos bem como diversos instrumentos sobre rotulagem ambiental, suas origens, e seu enquadramento normativo. É dada especial ênfase à metodologia de ACV preconizada na norma europeia EN 15804+A1:2013 sobre RCP para a elaboração de DAP em produtos de construção e à metodologia prevista na PAP. Efetua-se ainda uma revisão bibliográfica do estado do conhecimento em ACV de materiais cerâmicos, especificamente do tijolo, telhas, pavimento e revestimento.

No Capítulo 4 - Estudos de Caso, são apresentados os quatro estudos de caso de materiais cerâmicos (tijolo, telha, pavimento e revestimento) onde é aplicada a ACV para avaliar o desempenho ambiental e testadas algumas variáveis (metodológicas, temporais e tecnológicas) e estratégias de melhoria (ex. tipo de matéria-prima, combustível, modo de enfora, etc.) que podem influenciar os impactes. É ainda estudada a aplicação de outras medidas e políticas europeias (ex. MTD, rótulo ecológico) para reduzir o impacto ambiental destes materiais. É ainda estudado o comportamento ambiental ao longo do tempo (nos casos de estudo da telha, do tijolo e do pavimento).

Finalmente, no Capítulo 5 – Considerações Finais são apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho de investigação, incluindo recomendações e sugestões de melhoria do desempenho ambiental e são, ainda, identificadas possíveis linhas para desenvolvimento futuro.

Adicionalmente a tese contempla ainda 3 anexos, sendo que o primeiro aborda a lista de publicações completa decorrente dos trabalhos desenvolvidos na tese, o segundo os operadores de programa de registo de DAP, particularizando-se o sistema DAPHabitat, e o terceiro anexo detalha o impacto ambiental dos produtos cerâmicos em estudo, em tabelas por unidade funcional e por unidade declarada.

## 1.4 Contributos decorrentes dos trabalhos da tese

Com esta tese pretende-se contribuir para avanços na avaliação de desempenho ambiental de materiais cerâmicos aplicados na indústria da construção, nomeadamente:

1. aprofundar o conhecimento das principais questões e variáveis de influência (tecnológicas, combustíveis, matérias-primas, políticas e medidas europeias ambientais e energéticas, etc.), pontos críticos (“hotspots”) e fontes de “variabilidade” na ACV de materiais cerâmicos;
2. contribuir com avanços na ACV de produtos cerâmicos que é complexa e multifuncional, nomeadamente com a diferenciação temporal e espacial, estudo de categorias adicionais às dos materiais de construção (conforme EN15804+A1:2013);
3. contribuir para a melhoria das RCPs (para a função a desempenhar pelos materiais cerâmicos);
4. contribuir para a definição de valores de referência ou indicadores de desempenho ambiental para estes materiais cerâmicos utilizando dados específicos;
5. consciencializar e apoiar os fabricantes cerâmicos e demais partes interessadas ao longo da cadeia de valor para medidas e estratégias que possam diminuir impactos ambientais ao longo do seu ciclo de vida, promovendo a sustentabilidade e uma economia mais circular.

Neste item apresentam-se ainda alguns resultados do trabalho que foi desenvolvido ao longo desta tese, nomeadamente alguns progressos que foram sendo publicados em revistas ou congressos da especialidade potenciando a troca de conhecimento e experiência. Neste âmbito destacam-se os seguintes trabalhos publicados em revistas científicas ou capítulos de livros (peer-reviewed SCI journals):

- Almeida, M. I., Dias, A. C., Demertzi, M., & Arroja, L. (2015). Contribution to the development of product category rules for ceramic bricks. *Journal of Cleaner Production*, 92, 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.073>;
- Almeida, M. I., Dias, A. C., Demertzi, M., & Arroja, L. (2016). Environmental profile of ceramic tiles and their potential for improvement. *Journal of Cleaner Production*, 131, 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.131>;
- Quinteiro, P., Almeida, M., Dias, A. C., Araújo, A., & Arroja, L. (2014). Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1. In S. S. Muthu (Ed.), *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1* (Vol. 1, pp. 113–150). Spring Publications. <https://doi.org/10.1007/978-981-4560-41-2>

Adicionalmente apresentam-se, no anexo A.1, mais de trinta comunicações orais (e publicadas em livro de atas), efetuadas no decurso do trabalho da tese e expostas em conferências nacionais e internacionais.

## 2 A Indústria Cerâmica – Breve Caracterização

A indústria cerâmica é um sector tradicional da economia mundial, europeia e também nacional. De acordo com a Federação Europeia da Cerâmica (Cerame-Unie, 2017), a indústria cerâmica europeia representou, em 2016, aproximadamente 23% da produção mundial de materiais cerâmicos, o que correspondeu a um valor de cerca de 28 biliões de euros. Em termos de mão-de-obra empregou mais de 200 mil trabalhadores diretos, em cerca de 80% de empresas classificadas como PME (Pequenas e Médias Empresas).

De acordo com a Classificação Portuguesa das Atividades Económicas - Revisão 3 (CAE - Rev.3) em vigor, a indústria de cerâmica corresponde aos Grupos 323, 233 e 234 da CAE - REV.3, e abrange os seguintes subsectores: cerâmica estrutural (telhas, tijolos e abobadilhas); pavimentos e revestimentos; louça sanitária; cerâmica utilitária e decorativa (louça em porcelana, faiança, grés e barro comum) e cerâmicas especiais (isoladores e peças isolantes, cerâmica para usos técnicos, outros produtos cerâmicos não refratários e produtos cerâmicos refratários). Na Figura 2 apresenta-se uma representação esquemática dos subsectores da indústria cerâmica, destacando-se a cor de laranja no esquema os materiais objeto de estudo nos capítulos seguintes (tijolo, telha e ladrilhos (pavimento e revestimento)), uma vez são os mais utilizados nas soluções construtivas em Portugal. Adicionalmente são produtos com um consumo intensivo de energia e consequentemente geram impactes significativos no ambiente, pelo que urge o desenvolvimento de estratégias para o seu controlo e minimização, de forma sustentável e circular.

Todos estes subsectores da indústria cerâmica são consumidores intensivos de energia, particularmente devido aos processos de secagem e cozedura, que envolvem temperaturas de cozedura entre os 800 e os 2000 °C. De um ponto de vista genérico, os custos de energia na indústria cerâmica representam uma média de 30% do custo total de fabricação, sendo distribuídos por cerca de 85% de combustíveis e 15% da eletricidade (Cerame-Unie, 2012).

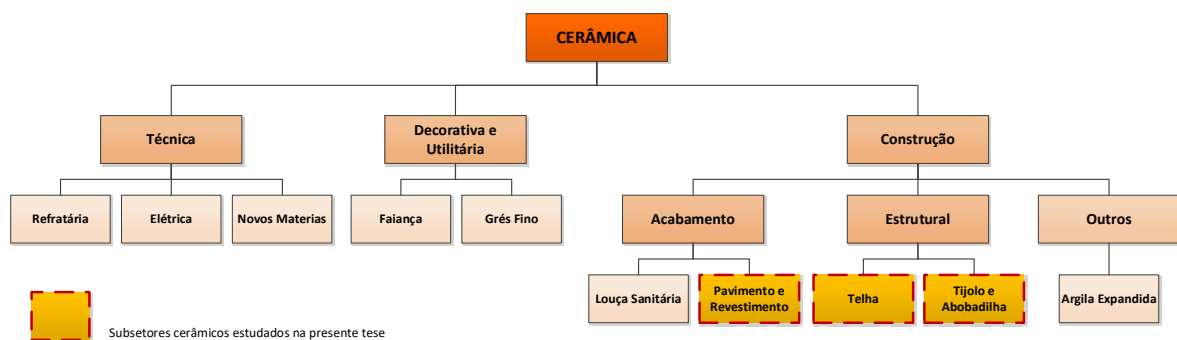


Figura 2 – Subsectores da indústria cerâmica (adaptado de Fernandes et al. (2004))



### 2.1 O sector em números

Os valores de produção (em milhões de €) da indústria cerâmica da UE-28 tem flutuado nos últimos anos (Eurostat, 2017), como ilustra a Figura 3, refletindo os ciclos económicos, particularmente a recessão económica mundial de 2008 e anos subsequentes. A recuperação tem sido muito lenta, atingindo em 2016 o maior valor desde a crise, porém ainda abaixo dos valores antes da recessão económica mundial. Além da recessão do mercado, também alguns subsectores de cerâmica, como a cerâmica utilitária e ornamental e os pavimentos e revestimentos, tem sentido a forte concorrência dos novos mercados emergentes como a Índia, China, Turquia entre outros.

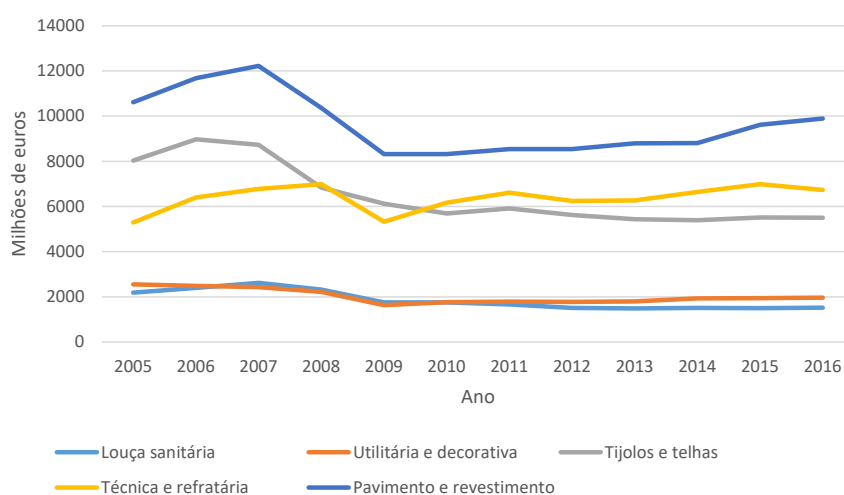


Figura 3 – Valores da produção (milhões €) dos subsectores da cerâmica da UE-28 (fonte: Eurostat, 2017)

A nível nacional, e de acordo com a APICER – Associação Portuguesa das Indústrias de Cerâmica e Cristalaria, a exportação dos produtos cerâmicos em 2016 cresceu 4% na União Europeia e 6,2% em Portugal, atingindo os 700,8 milhões de euros, apesar das exportações mundiais terem baixado para os 11,4% (APICER, 2018). A indústria cerâmica portuguesa posiciona-se assim na 11ª posição a nível mundial, atingindo a sexta posição a nível da União Europeia (com cerca de 4%) e na 18ª posição para o total de bens exportados, sendo de mencionar que ocupa o quarto lugar nos pavimentos e revestimentos não vidrados nem esmaltados e o sétimo lugar nas telhas cerâmicas a nível europeu (APICER, 2018, 2016). O sector cerâmico emprega cerca de 15900 trabalhadores (PWC, 2016).

Em termos de áreas de destino dos produtos cerâmicos, cerca de 72% do valor exportado é para mercado intracomunitário e 28% para mercado extracomunitário (Oliveira, 2018). Os dez principais mercados são a França, Espanha, Estados Unidos, Alemanha, Reino Unido, Países Baixos, Itália, Angola, Suécia e Bélgica.

As regiões de Portugal onde existe uma maior concentração da produção cerâmica e que mais contribuíram para as exportações nacionais em 2017 foram a Região Centro com 81,5% (com destaque para o contributo de 44% da Região de Aveiro, seguido de Leiria com 18% e Oeste com 11%) e a Região Norte com 11,8% (Oliveira, 2018).

Seguidamente efetua-se uma caracterização mais detalhada de cada um dos quatro produtos que serão analisados (tijolos, telhas, pavimento e revestimento).

### **2.1.1 Tijolos e telhas cerâmicas**

A nível europeu a produção de tijolos e telhas representa mais de 700 empresas, desde PMEs a grandes grupos internacionais, correspondentes a cerca de 1300 instalações industriais, que empregam cerca de 50 mil pessoas e geram um valor de produção de cerca de 5,5 bilhões de euros (TBE, 2017).

A nível nacional o volume de negócios deste subsector em 2016 ascendeu a 90,9 milhões de euros (65,4 milhões relativos à produção de telha; 20,5 milhões na produção de tijolos; 3,5 milhões na produção de abobadilhas e 1,4 milhões em outros produtos cerâmicos para a construção) e o valor acrescentado bruto (VAB) gerado correspondeu a 40,5 milhões de euros (INE, 2017).

Em Portugal, a produção de tijolos cerâmicos corresponde à classe 23321 (CAE - revisão 3), enquanto a produção de telha cerâmica acomoda-se à classe 23322 (CAE) e ambos pertencem ao subsector da cerâmica estrutural (telhas, tijolos e abobadilhas). Tendo como referência o ano de 2014, este subsector era composto por 142 empresas (20 produtoras de telha, 85 produtoras de tijolos, 9 produtoras de abobadilhas e 28 produtoras de outros produtos cerâmicos para a construção). Apesar de as empresas produtoras de tijolos no ativo serem apenas cerca de 38 (APICER, 2016).

As empresas deste subsector empregavam 1746 trabalhadores (959 na produção de telha, 622 na produção de tijolos, 99 na produção de abobadilhas e 66 no fabrico de outros produtos para a construção) em 2012 (APICER, 2016). As empresas de tijolo são, na sua maioria PME e possuem um quadro de pessoal relativamente reduzido (12 a 20 trabalhadores). Já as de telha, apesar de em número mais reduzido, são maioritariamente grandes empresas, com um quadro técnico mais complexo e diversificado.

O fabrico do tijolo é caracterizado por ser bastante regional uma vez que o seu custo é reduzido, pelo que a influência do custo de transporte tanto das matérias-primas como do produto final é elevado, para além de estar condicionado pelo facto de depender do tipo de construção da região e de condições climáticas. As exportações representam apenas 2% do total das vendas (INE, 2017).

No caso das telhas cerâmicas, as exportações em 2011 representaram 16,1 milhões de euros, ou seja, aproximadamente 19,5% do valor total das vendas, repartidas por 58

mercados internacionais, enquanto em 2015 representaram 21,4 milhões de euros (aproximadamente 33% do total das vendas), repartidas por 77 mercados internacionais (APICER, 2016). As exportações portuguesas de telhas cerâmicas em 2015 representavam 3,13% do total das exportações mundiais, correspondente ao 11.º lugar do ranking mundial, e ao 9.º lugar da EU, com uma quota de 3,97 % (APICER, 2018).

A evolução da produção de tijolo nacional tendo por referência um peso médio do tijolo (5 kg/tijolo) e os dados estatísticos nacionais (Eurostat, 2017) consta da Figura 4. Conforme se pode verificar a produção de tijolo decresceu de um modo muito significativo, constatando-se que a produção realizada em 2015 reduziu cerca de 81% face ao ano 2000.

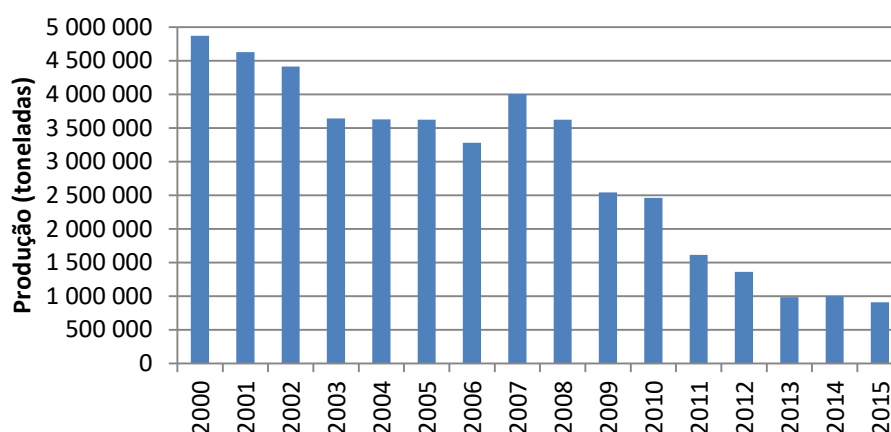


Figura 4 – Evolução da produção de tijolo cerâmico (2000 a 2015) (baseado no Eurostat e no peso médio nacional do tijolo)

A evolução da produção de telhas nacionais tendo por referência um peso médio da telha (3,9 kg/telha) e os dados estatísticos nacionais (Eurostat, 2017), consta da Figura 5.

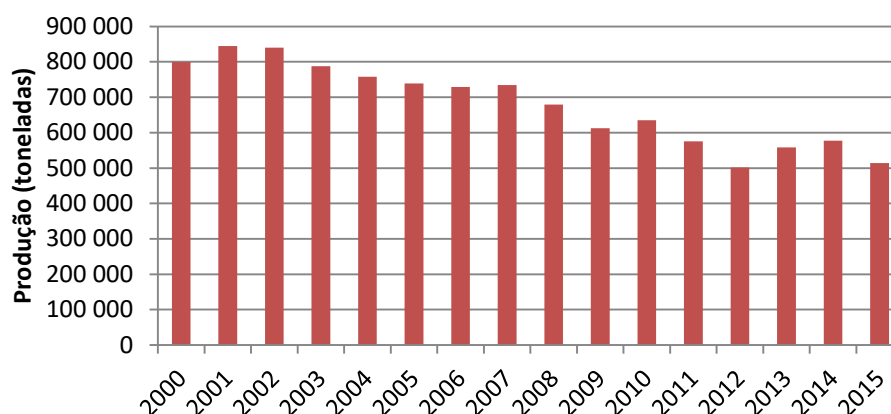


Figura 5 – Evolução da produção de telha cerâmica (2000 a 2015) (baseado no Eurostat e peso médio nacional da telha)

No caso da telha também se verifica um decréscimo da produção, de cerca de 36%, entre 2000 e 2015, reflexo da crise económica embora menos significativo do que para o tijolo, face à capacidade de exportação deste material.

### **2.1.2 Pavimento e revestimento**

A nível mundial a produção em 2014 foi de cerca de 12367 milhões de m<sup>2</sup>, com destaque para a China como maior produtor, seguida do Brasil (7,3%), Índia (6,6%), Espanha (3,4%) e Itália (3,1%). Em 2015 a produção cifrou-se nos 12355 milhões de m<sup>2</sup>, já em 2016 foi de 13056 milhões de m<sup>2</sup> (+5,7% que em 2015) enquanto a procura mundial foi de 12783 milhões de m<sup>2</sup> (+5,0% que em 2015), de acordo com o relatório “World production and consumption of ceramic tiles” (ACIMAC and MECS, 2017).

A nível europeu a produção cifrou-se nos 1192, 1218, 1304 milhões de m<sup>2</sup>, respetivamente em 2014, 2015 e 2016 (representando cerca de 10% da produção mundial), sendo Espanha o líder europeu. Assistiu-se assim a uma estabilização da produção de 2014 a 2016 após a grave crise de 2008, prevendo-se para 2018 um crescimento de 2 a 3% face à recuperação do sector da construção (incluindo reabilitação) (ACIMAC and MECS, 2017).

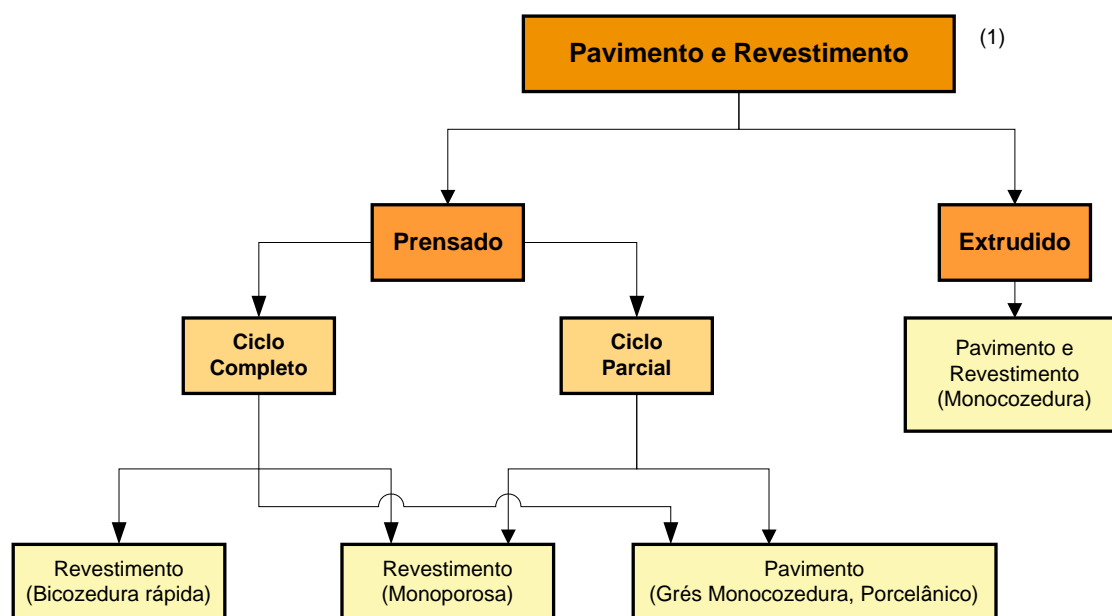
De mencionar que o Brasil, segundo maior produtor mundial, possui uma capacidade produtiva instalada de ladrilhos de 1.048 milhões de m<sup>2</sup> e em 2016 foram produzidos 792 milhões de m<sup>2</sup>, já as vendas totais atingiram 800,3 milhões de m<sup>2</sup> (ANFACER, 2017).

Em Portugal, a produção de pavimentos e revestimentos cerâmicos corresponde à classe 2331 da CAE, revisão 3. Este subsector possui uma capacidade de produção instalada que ascende a 80 milhões de m<sup>2</sup> e contribuiu para a economia nacional com um volume de produção em 2014 de cerca de 45 milhões de m<sup>2</sup> a que correspondeu um volume de vendas de cerca de 341,8 milhões de euros (Eurostat, 2017). Este subsector abrange cerca de 25 empresas no ativo, embora estejam registadas mais de 40 (incluindo empresas que efetuam apenas a transformação de componentes como sejam listelos, entre outros), a que correspondem mais de 3700 empregos diretos. Já a nível europeu o volume de vendas foi superior a 27 bilhões de euros em 2014 na Europa (Eurostat, 2017) e a mais 200.000 empregos diretos (Cerame-Unie, 2017). Na Tabela 1 constam os dados estatísticos (INE, 2017) relativos à fabricação nacional de ladrilhos, mosaicos e placas de cerâmica no ano de 2015 (ano de referência para os pavimentos e revestimentos em estudo no capítulo 4).

Tabela 1 – Produção por tipo de produto de acordo com o CAE (fonte: INE, 2017)

Tipo de produto de acordo com o CAE	Quantidade (m <sup>2</sup> )
Ladrilhos, mosaicos, cubos, pastilhas e artigos semelhantes, de cerâmica, não vidrados nem esmaltados, cuja superfície seja < 49 cm <sup>2</sup>	91 233
Ladrilhos, mosaicos, cubos, pastilhas e artigos semelhantes, de cerâmica, vidrados ou esmaltados, cuja superfície seja < 49 cm <sup>2</sup>	2 051 361
Ladrilhos e placas (lajes) para pavimentação ou revestimento, não vidrados nem esmaltados, de cerâmica e grés; cubos, pastilhas e artigos semelhantes, para mosaicos, não vidrados nem esmaltados, de cerâmica, mesmo com suporte	7 449 048
Ladrilhos e placas (lajes) para pavimentação ou revestimento, de grés, cuja superfície seja > 90 cm <sup>2</sup> , vidrados ou esmaltados	9 386 292
Outros ladrilhos e placas (lajes) para pavimentação ou revestimento, vidrados ou esmaltados, de cerâmica (m <sup>2</sup> )	19 188 644

A Figura 6 representa as principais tecnologias de fabrico desta tipologia de produtos.



(1) Ladrilhos cerâmicos

Figura 6 – Principais tecnologias de fabrico de pavimento e revestimento (Fonte: adaptado de Fernandes et al, (2004))

Apesar do processo de fabrico de pavimento e revestimento ser muito semelhante, as funções que desempenham numa obra de construção são distintas, bem como as matérias-primas, as curvas e as temperaturas máximas de cozedura, logo os impactes expectáveis serão distintos.

## 2.2 Breve descrição geral do processo de fabrico

As principais etapas do processo produtivo do sector cerâmico são as seguintes:

- pré-produção: extração, transporte e armazenamento de matérias-primas;
- produção: incluiu os processos unitários de preparação de matérias-primas, conformação, secagem e cozedura, que decorrem na instalação fabril;
- pós-produção: distribuição, utilização (incluindo a sua instalação, reparação, manutenção e uso propriamente dito) e fim de vida (demolição).

Assim, o ciclo de vida de um material cerâmico para a construção, tal como outros materiais de construção, inclui a extração das matérias-primas, passando pelo processo produtivo, construção, utilização e manutenção e, por fim, pelo tratamento final na etapa de fim de vida (Anderson and Thornback, 2012), conforme Figura 7.



Figura 7 – Ciclo de vida de um material cerâmico de construção

O processo de fabrico genérico inclui processos unitários semelhantes como o armazenamento de matérias-primas, materiais auxiliares e aditivos, preparação de matérias-primas, conformação, secagem, cozedura, tratamento subsequente (adicional), escolha e embalagem, conforme Figura 8.

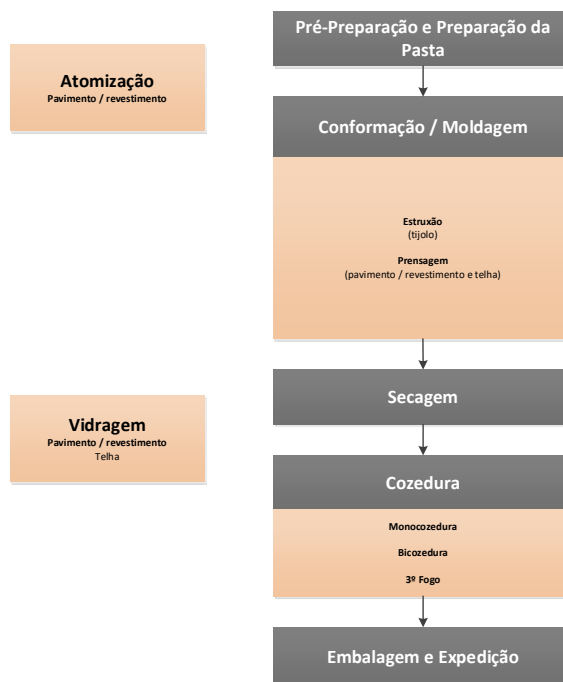


Figura 8 – Principais fases do processo de fabrico cerâmico (adaptado de Serrano et al. (2007) e European Commission (2007))

No entanto, estas fases de fabrico podem variar de acordo com requisitos específicos dos produtos cerâmicos, características das matérias-primas, opções tecnológicas, conforme se explanará nos itens seguintes.

### **Extração de matérias-primas e seu transporte**

A extração de argila, caulino, feldspato, quartzo, materiais argilosos, e a maioria das outras matérias-primas utilizadas, geralmente ocorre em minas ou pedreiras e em alguns casos a areia é obtida de rios. Algumas destas matérias-primas, como por exemplo o caulino, podem ser pré-processadas na pedreira. No caso da produção de telhas e tijolos estes locais de extração são em regra próximos dos locais de produção por razões de viabilidade técnica e económica.

O transporte para a unidade fabril é principalmente realizado por via rodoviária (camião), mas também pode ocorrer por via ferroviária. Dependendo das suas características e do estado de processamento, as matérias-primas são armazenadas em pilhas abertas (ex. tijolo), armazéns cobertos subdivididos em lotes (ex. telha), silos (ex. pavimento e revestimento).

De mencionar que as argilas para tijolos e telhas apresentam contudo características muito diferenciadas por toda a Europa, em termos de composição química e mineralógica dada a sua formação geologia (European Commission, 2007).

### ***Preparação de matérias-primas***

A preparação de matérias-primas consiste na mistura de diversas matérias-primas (umas com características de maior plasticidade e outras menos plásticas) e aditivos, com o objetivo de obter um material com composição homogênea e distribuição granulométrica adequada. É efetuada com recurso a equipamentos próprios que variam muito de subsector para subsector, desde moinhos, destorroadores e laminadores (utilizados no fabrico de tijolo e telha), a moinhos, turbodiluidores, atomizadores, etc., utilizados no fabrico de pavimento e revestimento. O tipo de transporte destas matérias-primas dentro da fábrica é função das suas características (ex. granulometria, fluidez, temperatura, resistência ao atrito, etc.) e do lay-out fabril, sendo usual no tijolo e telha o transporte em tapetes, enquanto no pavimento e revestimento para além de tapetes, elevadores de alcatruzes, sistema pneumático é utilizada a bombagem para a barbotina.

### ***Conformação***

A conformação do produto cerâmico visa dar a forma ao produto e depende do tipo de produto e da técnica aplicada: (1) prensagem a seco para pavimento e revestimento e artigos de louça ornamental; (2) moldagem plástica ou extrusão para artigos de louça ornamentais, tijolos e telhas (extrusão seguida de moldagem); (3) processo de enchimento para louças ornamentais, louça sanitária e cerâmicas refratárias (European Commission, 2007; Fernandes et al., 2004; Serrano et al., 2009).

No caso da prensagem a seco, o pó atomizado (teor de humidade de 5 a 7%) segue para silos e posteriormente para prensas onde é pressionado em moldes; já no caso da extrusão o teor de humidade é na ordem dos 17 a 20%, enquanto na modelagem plástica (enchimento) as peças após abertura de moldes da olaria (condições de temperatura e humidade controladas) podem apresentar um teor de humidade de 20 a 25%).

### ***Secagem***

A louça verde após conformação ainda contém água, sendo portanto necessário remover esta água, lenta e gradualmente de forma a evitar tensões e produtos não conformes, podendo ser realizada em secadores intermitentes, secadores contínuos, secadores semi-contínuos, variando a temperatura entre 50 e 350 °C (European Commission, 2007; Serrano et al., 2009) em função da tipologia de produto.

O calor para a secagem é principalmente fornecido por queimadores a gás natural (ex. louça ornamental, sanitário, pavimento e revestimento) ou por ar quente ambiente recuperado da zona de arrefecimento de fornos túnel (ex. tijolo, telha). No caso de tijolos e telhas, os ciclos de secagem são de 16 a 24 horas, com temperatura em torno de 60 a 100 °C. Já para o pavimento e revestimento cerâmico, é vulgar o uso de secador vertical, alimentado a gás natural, com temperaturas a rondar os 200 °C, em ciclos de secagem que variam de 35 a 50 minutos. Nos secadores de rolos horizontais de vários andares, menos



usados, a temperatura máxima é geralmente superior aos verticais (cerca de 350 °C) e os ciclos de secagem são mais curtos (entre 15 a 25 minutos).

### ***Tratamento superficial e decoração***

As peças secas podem depois ser sujeitas a operações de tratamento superficial ou decoração como vidragem, engobagem quer por via húmida quer por via seca, ou outras técnicas de decoração (ex. serigrafia, gravura e impressão em flexografia, impressão digital (tecnologia mais recente)). No processo de vidragem, a peça cerâmica seca é coberta com uma fina camada de vidrado, seguida de um ciclo de cozedura, que fecha o corpo cerâmico poroso, tornando a superfície estanque e suave.

### ***Cozedura***

Durante a cozedura o material sofre transformações físicas e químicas que lhe confere as propriedades finais em termos de dimensões, geometria, absorção de água, resistência mecânica, cor, densidade entre outras. As temperaturas máximas e ciclo de cozedura variam muito de produto para produto, podendo ir dos 850 °C (ex. tijolos) até aos 1300 °C (pavimento e revestimento, louça utilitária e decorativa e sanitário, cerâmicos técnicos) e os refratários podem atingir os 1500 °C.

Existe uma grande diversidade de fornos, no entanto os mais vulgares são fornos de túnel (ex. tijolo, telha, louça), fornos intermitentes (muito vulgares no fabrico de louça utilitária e decorativa, sanitário, isoladores cerâmicos e acessórios de telhado) e fornos de rolos (muito vulgares no fabrico de pavimento e revestimento).

A cozedura pode ser efetuada apenas num ciclo de cozedura (monocozedura) ou em dois ciclos de cozedura (bicozedura), sendo que a decoração é realizada após à primeira cozedura ou de chacota, podendo ainda existirem cozeduras posteriores de decoração ou retoque. Vulgarmente no caso do tijolo, telha, pavimento e revestimento é utilizada apenas a monocozedura, tendo grande parte da indústria nacional de pavimento e revestimento evoluído de bicozedura para monocozedura (Fernandes et al., 2004).

Os combustíveis mais utilizados são o gás natural (ex. telha, pavimento e revestimento) e ainda os combustíveis sólidos (coque de petróleo e biomassa - casca, pó de cortiça, serrim, entre outros) no caso do fabrico de tijolo. A utilização de combustível depende não só de razões e tecnologia, mas também de fatores económicos e disponibilidade da rede de combustíveis (ex. gás natural).

### ***Tratamento subsequente***

Após a cozedura, alguns produtos sofrem ainda um tratamento adicional que pode incluir polimento, amaciamento, corte, retificação, entre outros (acabamento do produto). Neste processo é utilizada energia elétrica, água para as operações de corte, retificação e

tratamento e ainda secadores (elétricos ou a gás natural) que funcionam a baixas temperaturas (ordem dos 40 a 70 °C) para secagem do material.

***Escolha, Embalagem e Armazenamento***

As operações de carga e descarga de produtos são efetuadas por sistemas automatizados (mais vulgar) ou manuais (menos usual e mais vulgar para produtos de louça utilitária e decorativa), que incluem o agrupamento, transferência e empacotamento dos produtos.

A escolha pode ser manual ou automática em máquinas adequadas ao efeito. Já a embalagem pode ser agrupada, mais vulgar em produtos de construção, ou individual mais vulgar em algumas peças de louça utilitária e decorativa.

No capítulo 4 será efetuada uma descrição de maior pormenor e aplicada aos casos em estudo de cada um dos materiais cerâmicos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

### **3 Estado da arte**

Nesta tese é aplicada a técnica de avaliação de ciclo de vida (ACV) para determinar o desempenho ambiental de materiais cerâmicos aplicados de modo ubíquo na construção, em particular o tijolo, a telha e os ladrilhos. Nos itens seguintes será detalhado o estado do conhecimento quer em termos da ferramenta da ACV quer em termos da sua aplicação prática aos materiais cerâmicos em estudo (tijolo, telha e ladrilhos).

#### **3.1 Avaliação do ciclo de vida**

##### **3.1.1 Contexto e evolução histórica**

Os primeiros estudos de avaliação do impacto ambiental potencial de produtos apareceram em torno do final da década de 1960 e início de 1970, no âmbito do Resource Environmental Profile Analysis (REPA) (Curran, 2012), nomeadamente o potencial esgotamento ou depleção dos recursos energéticos, a necessidade de uma eficiente gestão energética e de controlo da poluição (Boustead, 1974; Sundstrom, 1971). No entanto, foi no final da década de 1970 e inícios de 80 que o interesse em torno da ACV começou a crescer, nomeadamente em torno das embalagens, tendo posteriormente evoluído de apenas um enfoque na redução de resíduos, processo de fabrico e embalagens do produto, até uma análise de necessidades de energia, após a crise de petróleo dos anos 1970, para o reconhecimento de uma ampla gama de impactes ao longo da vida de um produto (Anderson & Thornback, 2012; Ferrão, 1998; Ferrão, 2009).

Mais tarde, já em 1979, foram lançadas as bases para o desenvolvimento da metodologia de ACV harmonizada, com a criação da SETAC - Society of Environmental Toxicology and Chemistry, com representantes da comunidade científica, da indústria e de entidades públicas. O "Code of practice" foi um dos relatórios mais importantes da SETAC com o objetivo de melhorar e harmonizar os métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) (Consoli, 1993) e a consequente interpretação dos resultados da ACV. Os primeiros métodos de AICV foram publicados no início da década de 1990, como o método suíço Ecoscarcity (ou "Ecopoints") (Ahbe et al., 1990) e a metodologia CML 1992 (Heijungs et al., 1992).

A Organização Internacional para a Normalização (ISO) criou em 1992 um comité técnico (TC 207/SC 5) tendo em vista a normalização de um número de abordagens de gestão ambiental, incluindo ACV (Ferrão, 1998; Tibor and Feldman, 1996). A primeira norma ISO sobre ACV (ISO 14040) foi publicada em 1997 e apresentou os princípios e enquadramento, seguindo-se a ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043, que foram posteriormente revogadas e substituídas por novas versões, nomeadamente a ISO14040:2006 (ISO, 2006a) e a

ISO14044:2006 (ISO, 2006b). A ISO14040:2006 (ISO, 2006a) está atualmente em fase de revisão, nomeadamente encontra-se em discussão uma emenda ao texto referente à revisão crítica de acordo com a ISO/TS 14071 (ISO, 2014a), bem como termos e metodologias relacionados com as pegadas nomeadamente os constantes na ISO 14026:2017 (ISO, 2017).

Existem ainda em vigor relatórios técnicos (“TR”) ou especificações técnicas (“TS”) relacionados com ACV e que auxiliam em diversas áreas como sejam na seleção de dados e formato de dados, exemplos ilustrativos de aplicação da ACV, processo de revisão crítica entre outras (ISO, 2017, 2014a, 2014b, 2012a, 2012b, 2002). Existem também uma série de normas que adotam a ACV como modelo de determinação de impactos ambientais, nomeadamente as relacionadas com a DAP (ver item 3.1.3) e instrumentos como a PAP (ver item 3.1.4).

Para além do Comité Técnico ISO, o envolvimento do United Nations Environmental Program (UNEP), cujo âmbito abrange a ACV, pretendeu dar resposta à procura mundial de uma gestão ambiental mais confiável, onde as questões ambientais ocupam relevância no contexto das estratégias de negócio ou suas opções, desenvolvendo uma série de ferramentas neste âmbito (Frischknecht and Jolliet, 2016).

De mencionar porém que a importância dada às questões ambientais altera-se ao longo do tempo, citando-se que na década de 60 e 70 as questões ambientais estavam mais relacionadas com a crise energética; já na década de 80 com os clorofluorcarbonos (CFC’s) e que conduziram à depleção da camada do ozono, e no início do século XXI prende-se com as alterações climáticas relacionadas com as emissões de gases com efeito de estufa (Anderson and Thornback, 2012).

A Europa tem vindo a ser a principal impulsionadora e dinamizadora da introdução do conceito de ciclo de vida na sociedade em geral, estando na linha da frente no que toca às iniciativas de promoção destas preocupações, promovendo a abordagem do Life Cycle Thinking (LCT) – Pensamento de Ciclo de Vida, como apoio às atuais políticas ambientais e à decisão de negócios relacionados com o consumo e a produção sustentáveis (Curran, 2012; Finkbeiner et al., 2010). De entre os países europeus destaca-se o papel da Suécia, Alemanha, Holanda e Suíça, mas também a nível mundial o do Japão e dos EUA, para o progresso de ferramentas para obtenção, validação e armazenamento de dados necessários ao desenvolvimento de inventários do ciclo de vida das principais atividades e serviços industriais (Ferreira, 2009).

Em 2005 a UE lançou a plataforma “European Platform on Life Cycle Assessment” de forma a abordar e ultrapassar os problemas de consistência de dados e diferentes metodologias de AICV nos estudos de ACV (European Commission, 2014b; Gervásio and Silva, 2007). A UE criou ainda o International Reference Life Cycle Data System (ILCD) – Sistema Internacional de Referência de Dados de Ciclo de Vida, o qual fornece uma base para

garantir a qualidade e consistência dos dados, bem como métodos AICV coerentes e de qualidade (EC-JRC, 2012, 2011, 2010a, 2010b). Um estudo do JRC (Joint Research Center) refere que, a revisão crítica das bases de dados aumenta a sua credibilidade, consistência e confiança na comunicação de dados de desempenho ambiental (Fazio, 2016).

Hoje em dia, a importância da ACV continua a aumentar, sendo considerada nas iniciativas e políticas europeias, das quais se destaca o Green Public Procurement (Comissão Europeia, 2008, 2010a), o Regulamento do Rótulo Ecológico da União Europeia (Comissão Europeia, 2010b), a Diretiva de conceção ecológica (Comissão Europeia, 2009a) e ainda a pegada ambiental das organizações e produtos (Comissão Europeia, 2013a). O próprio Regulamento Europeu n.º 305/2011 (Comissão Europeia, 2011b), sobre a comercialização dos produtos da construção, menciona os sete requisitos básicos de construção, referindo que para a avaliação da utilização dos recursos e do impacto das obras de construção, deverão ser utilizadas DAPs, se disponíveis. Também a indústria está a incrementar o uso da ferramenta de ACV de forma a reduzir as cargas e os impactes ambientais ao longo do ciclo de vida dos produtos e serviços que produz, promovendo o ecodesign, a economia circular e procurando simultaneamente aumentar a competitividade e a comunicação fidedigna (Comissão Europeia, 2015).

Segundo a ISO 14044:2006 (ISO, 2006b) a ACV pode ser útil para:

- identificação de oportunidades de melhoria do desempenho ambiental dos produtos em vários pontos do seu ciclo de vida,
- informação aos decisores na indústria, em organizações governamentais e não governamentais (por exemplo, no planeamento estratégico, definição de prioridades, design ou redesign de produtos ou processos),
- seleção de indicadores relevantes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição, e
- (eco)marketing (por exemplo, na implementação de esquemas de rotulagem ecológica, elaboração de uma alegação ambiental ou produção da DAP).

A ACV como ferramenta sistemática, de carácter integrador, provou também ser um instrumento de excelência apropriado para a análise e seleção de alternativas (ex. materiais, energia, processos, tecnologias) apoiando a tomada de decisão da indústria e outras organizações. A técnica de ACV promove simultaneamente as informações que contribuem para a sustentabilidade ao longo do ciclo de vida (Ferrão, 2009; Gervásio, 2010; Gervásio and Silva, 2007; Mateus, 2009; Silvestre, 2012). Nos itens seguintes (3.1.3 e 3.1.4) serão abordadas as aplicações práticas da ACV associadas à rotulagem ambiental, utilizadas no desenvolvimento da presente tese.

### 3.1.2 Metodologia da ACV

A metodologia designada por ACV avalia os potenciais impactes ambientais associados, através da compilação de um inventário das trocas ambientais mais relevantes ao longo do ciclo de vida (ISO, 2006b). Este método baseia-se na análise de sistemas onde os processos fazem parte de uma cadeia de subsistemas que trocam *inputs* (entradas) e *outputs* (saídas) entre si, permitindo identificar, no final, as áreas mais críticas ou as que necessitam de melhorias (*hotspots*) (Curran, 2014; EC-JRC, 2010b; Ferrão, 2009; Guinée et al., 2011; Hauschild and Huijbregts, 2015; ISO, 2006b; Schaltegger et al., 1996).

Na Figura 9 apresenta-se uma representação esquemática das fases da ACV de acordo com as normas ISO 14040 (ISO, 2006a) e ISO14044 (ISO, 2006b). Estas normas estabelecem que um estudo de ACV organiza-se em quatro fases:

- a) definição do objetivo e âmbito,
- b) inventário,
- c) avaliação de impacto, e
- d) interpretação.

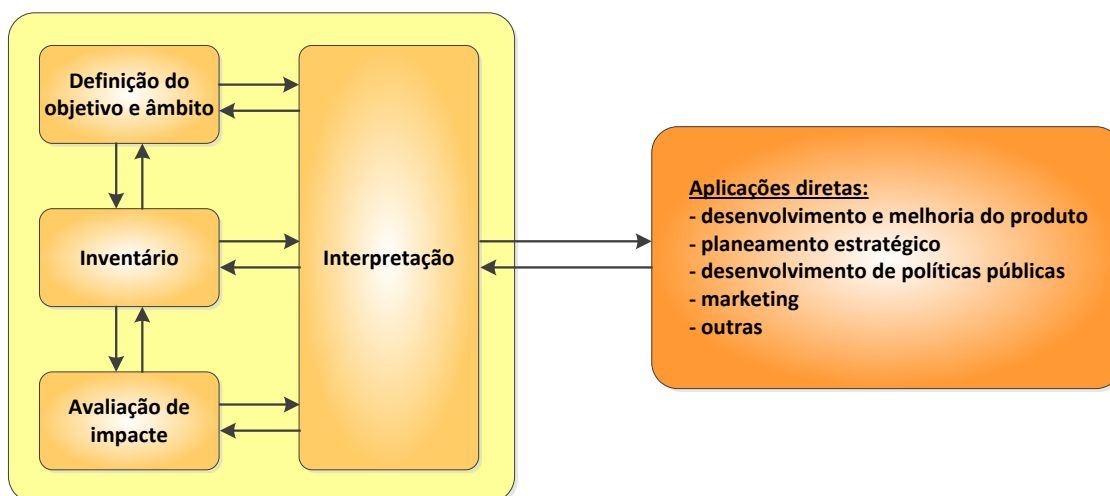


Figura 9 – Fases de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) (adaptado da norma EN ISO 14040, 2006)

Cada uma das fases, na Figura 9, está ligada com setas duplas ilustrando que a ACV é um processo iterativo, onde as alterações podem ocorrer entre as distintas fases face à experiência recolhida (por ex. face ao aparecimento de novo processo ou material durante o inventário, pode implicar um regresso à fase de objetivo e âmbito), conforme a ACV vai avançando torna-se mais focada.

### 3.1.2.1 Definição do objetivo e âmbito

O objetivo da ACV estabelece a aplicação pretendida, as razões do estudo, o público-alvo (a quem se pretende comunicar os resultados do estudo) e quem o promove (ISO, 2006a). Já o âmbito inclui o sistema de produto em estudo e os seus limites (fronteiras do sistema), as funções do sistema de produto, e efeitos ambientais a serem revistos na avaliação. O âmbito deve ainda incluir a unidade funcional, os procedimentos de alocação<sup>1</sup>, as categorias de impacto selecionadas, os requisitos dos dados, os pressupostos, as limitações, os requisitos da qualidade dos dados iniciais, o tipo de revisão crítica se existente, o tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

O âmbito deve ser claramente definido para assegurar que a extensão, a profundidade e o detalhe do estudo sejam suficientes, para atingir os objetivos planeados. O detalhe da explanação deverá ser ajudado, podendo não ser tão completo quanto descrito acima, se a ACV se destina a ser utilizada apenas internamente numa empresa, por exemplo para otimizar o "*design*" do produto (Heijungs et al., 1992).

De entre os vários elementos referidos anteriormente, destaca-se a unidade funcional, que deve ser claramente definida e mensurável, constituindo uma referência segundo a qual os dados de inventário (entradas e saídas do sistema) são normalizados (num sentido matemático). Esta referência assegura que a comparabilidade dos resultados ACV seja feita numa base comum, sendo especialmente crítica quando diferentes sistemas estão a ser avaliados (Curran, 2012). Também os requisitos de qualidade dos dados especificam, em termos gerais, as características dos dados necessários para o estudo e devem ser definidos para proporcionar o alcance dos objetivos e âmbito estabelecidos para o estudo de ACV. Os requisitos de qualidade dos dados devem referir: cobertura temporal; cobertura geográfica; cobertura tecnológica; precisão, integridade e representatividade dos dados; consistência e reprodutibilidade dos métodos utilizados ao longo da ACV; fontes dos dados e sua representatividade e incerteza da informação (ISO, 2006a, 2012b).

### 3.1.2.2 Inventário do ciclo de vida

A fase de inventário envolve a recolha, identificação e quantificação de entradas e saídas para um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. As entradas incluem os consumos de matérias-primas, matérias auxiliares, energia e água, enquanto as saídas incluem o produto, os eventuais subprodutos, e as descargas para o ambiente como sejam

---

<sup>1</sup> A alocação serve para imputar cargas ambientais a produtos ou co-produtos ou multi-input durante as etapas do ciclo de vida. Esta técnica deve ser evitada, sempre que possível (por exemplo através da desagregação do sistema e expansão das fronteiras). Quaisquer procedimentos de alocação, com base em características físicas ou químicas ou económicas devem ser devidamente especificados e documentados.



resíduos e emissões para a água, ar e solo. Esta fase é provavelmente a que consome mais tempo e a mais complexa.

O processo de condução do inventário de ciclo de vida (ICV) é iterativo, pois à medida que os dados são conhecidos e mais informação acerca do sistema é adquirida, novos requisitos de dados ou processos para a sua recolha ou limitações podem ser identificados, de forma a que os objetivos do estudo sejam cumpridos ou seja determinada a sua revisão de acordo com a ISO 14040 (ISO, 2006a). Também se poderá dar o caso da necessidade de redefinir a fronteira, por exemplo face à escassez de dados.

Após a recolha de dados é necessário definir os métodos de tratamento de dados, sendo que no caso de produção multiproduto ou processamento de resíduos (por exemplo relacionados com a reutilização e reciclagem) pode ser necessário aplicar a alocação.

De acordo com a ISO 14044 (ISO, 2006b) e o CEN/TR 15941:2010 (CEN, 2010), os dados devem ser obtidos das empresas que operam os processos específicos (“dados específicos”) podendo, caso estes não estejam disponíveis, recorrer-se a dados genéricos de bases de dados ou referências bibliográficas. Os dados devem ser baseados num período de tempo, que seja suficientemente longo, de forma a serem representativos.

Dois princípios de modelos de ICV podem ser utilizados na ACV: modelo consequential e atribucional, sendo este último o mais usado por razões históricas e práticas.

O modelo de ciclo de vida atribucional de um produto inclui o inventário dos fluxos de entrada e saída dos processos à medida que eles ocorrem efetivamente, sendo o sistema incorporado numa tecnosfera estática, enquanto no modelo consequential o inventário dos processos é tratado como teoricamente esperado em consequência da decisão tomada. Este sistema interage com os mercados e as mudanças são tratadas numa tecnosfera dinâmica que reage à procura adicional do produto (EC-JRC, 2011, 2010a).

### **3.1.2.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida**

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) tem como objetivo compreender e avaliar a significância dos impactos ambientais potenciais de um sistema utilizando os resultados do ICV. Assim, nesta fase são analisados os efeitos (no homem e ambiente) da utilização de energia, água e materiais, assim como das descargas identificadas no inventário. Este processo envolve a associação dos dados de inventário a categorias específicas de impacto ambiental. De notar que esta avaliação não é uma avaliação completa de todas as questões ambientais do sistema de produto em análise, mas antes das questões especificadas no objetivo e âmbito.

De acordo com a ISO 14044 (ISO, 2006b), a AICV desenvolve-se através de seis elementos, dos quais apenas três são obrigatórios, de acordo com o representado na Figura 10:

### *1. Seleção de categorias de impacto (obrigatório)*

Seleção das categorias de impacto, bem como dos respectivos indicadores e modelos de caracterização. É uma etapa tecnicamente complexa, existindo muitos indicadores e modelos de caracterização, e em constante alteração (BJorn et al., 2015).

### *2. Classificação (obrigatório)*

Os fluxos elementares do ICV (por exemplo, o consumo de recursos, energia, emissões para o ar, etc.) são imputados a categorias de impacto de acordo com a natureza das substâncias que contribuírem para as questões ambientais.

### *3. Caracterização (obrigatório)*

A caracterização envolve a conversão dos dados de ICV em unidades comuns e a agregação dos resultados convertidos numa mesma categoria de impacto (ISO, 2006b). Esta conversão utiliza fatores de caracterização, que devem ser identificados e documentados, incluindo as escolhas de valor e pressupostos utilizados. O resultado é expresso como uma pontuação de impacto numa unidade comum a todas as contribuições dentro da mesma categoria de impacto.

### *4. Normalização (opcional)*

A normalização tem por objetivo compreender melhor a magnitude relativa de cada resultado do indicador do sistema de produto em estudo face à informação de referência (ISO, 2006b). Esta técnica pode ser útil, por exemplo, para verificar inconsistências, prover e comunicar informação de forma relativa do resultado dos indicadores e preparar para procedimentos adicionais, tais como, agrupamento, ponderação ou interpretação (Curran, 2012).

### *5. Agregação (opcional)*

A agregação é a imputação das categorias de impacto a um ou mais conjuntos como pré-definido na fase de objetivo e âmbito. Pode envolver a ordenação e/ou hierarquização das categorias de impacto.

### *6. Ponderação (opcional)*

Envolve converter e possivelmente agregar os resultados do indicador nas categorias de impacto utilizando fatores numéricos baseados em escolhas de valor de acordo com a sua importância relativa.

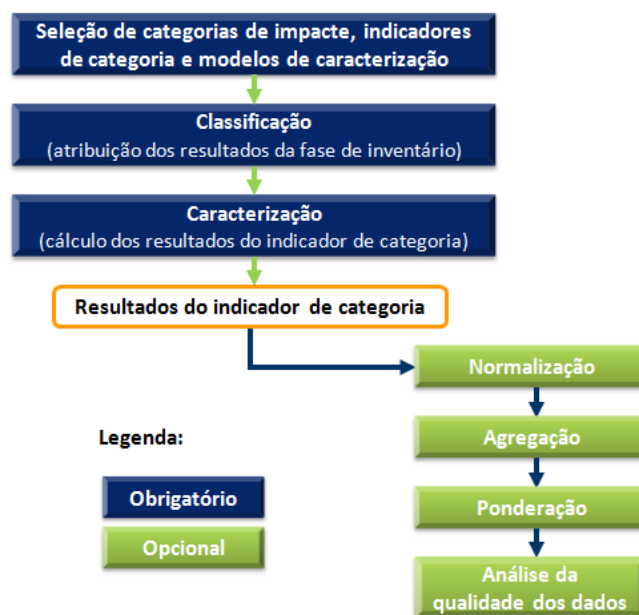


Figura 10 – Elementos obrigatórios e opcionais da fase de avaliação de impacto ambiental, segundo a norma ISO 14044

### 3.1.2.4 Interpretação do ciclo de vida

A interpretação é a fase final da ACV na qual os resultados, quer do inventário, quer da avaliação de impacto, ou de ambas, são discutidos relativamente ao objetivo e âmbito definidos, com vista à obtenção de conclusões, recomendações e eventual tomada de decisão. O objetivo principal é aumentar a confiança e significado do estudo de ACV.

A JRC European Commission (EC-JRC, 2010a) recomenda, de acordo com a ISO 14040 e ISO 14044, que a interpretação inclua as três etapas seguintes:

- identificar as questões significativas (ou seja, os principais processos, parâmetros, pressupostos e fluxos elementares);
- avaliar essas questões quanto à sua plenitude, sensibilidade ou influência sobre os resultados globais da ACV, consistência e incluir uma avaliação global da ACV;
- formular as conclusões e recomendações da ACV com base nos resultados das fases anteriores. Nos estudos de caso comparativos, outras considerações adicionais devem ser tomadas em conta e incluídas na interpretação.

Não existe uma metodologia única para a realização da ACV. As organizações têm flexibilidade para implementar a ACV tal como estabelecida na norma ISO 14040, de acordo com a aplicação e os requisitos da organização (ISO, 2006a).

No entanto, segundo alguns autores (Abd Rashid and Yusoff, 2015; Almeida et al., 2015b, 2016a, Curran, 2012, 2014; Del Borghi, 2013; EC-JRC, 2011; Santos, 2012; Schaltegger et al., 1996) a efetividade da ACV como instrumento de auxílio à tomada de decisões poderá ser incrementada, face a algumas limitações que a ACV possui, nomeadamente:

- a qualidade e disponibilidade de fontes de dados é essencial para a credibilidade, reprodutibilidade e precisão da avaliação, particularmente quando o processo exige o alargamento das fronteiras do sistema;
- o estudo de ACV necessita de muitos recursos e arrasta-se por muito tempo, implicando custos elevados;
- a comparação de diferentes categorias de impacto ambiental é bastante difícil de estabelecer, nomeadamente quando a unidade (funcional ou de referência) é distinta;
- a previsão de potenciais efeitos, e não de reais impactes ambientais;
- é complexo o processo de estabelecimento de uma hierarquia entre as categorias de impacto ambiental estabelecidas, que variam com a agenda ambiental específica de cada local, enfermando assim de um procedimento essencialmente subjetivo;
- os procedimentos de alocação não estão totalmente harmonizados, nomeadamente no caso de co-produtos e produtos com teor reciclável;
- a análise é estática, apesar de começarem a existir abordagens mais dinâmicas para alguns produtos (Demertzi, 2016);
- os métodos de AICV, apresentam ainda alguma subjetividade, pelo que os seus resultados apresentam fraca uniformidade (Bersimis and Georgakellos, 2013);
- os resultados da ACV devem ser usados como uma componente dum processo abrangente de tomada de decisão, podendo ser necessário suplementar a ACV com outras ferramentas ou métodos (Curran, 2014);
- desconhecimento do destino e uso reais dos produtos, particularmente os de construção que têm ciclos de vida longos.

### **3.1.3 Rotulagem ambiental**

Os rótulos e declarações ambientais são ferramentas de gestão ambiental, que fornecem informações sobre um produto ou serviço no que diz respeito ao seu cariz ambiental ou a aspetos ambientais mais específicos. O objetivo global dos rótulos e declarações ambientais é encorajar a procura e a oferta dos produtos e serviços que causam menor pressão sobre o ambiente, estimulando deste modo o potencial de melhoria ambiental

continua ao longo da cadeia de abastecimento induzida pelo mercado. Para tal, deve comunicar-se informação verificável e exata, não enganosa, relativa a aspetos ambientais dos produtos e serviços (ISO, 2000). É uma ferramenta que pretende motivar o desenvolvimento de padrões de consumo “mais sustentáveis”, contribuindo para políticas e práticas de desenvolvimento de atividades e produtos com menores impactes no ambiente, bem como para uma eventual diferenciação positiva nas compras públicas e privadas. De destacar que no caso dos materiais de construção, a cadeia de intervenientes é grande e dispersa espacialmente, pelo que se torna complexa a difusão da informação ambiental a todos os intervenientes (Silvestre, 2012; Silvestre et al., 2010).

Existem muitas tipologias de rótulos e declarações ambientais, com diferente objetivo, com distinto público-alvo, com um maior ou menor detalhe dos aspetos e impactes ambientais. A Alemanha criou o “selo verde” Anjo Azul (Blue Angel), em 1977/78, baseada em recomendações do Conselho da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) focadas no uso de recursos e reciclagem de resíduos, sendo que dez anos mais tarde, este selo contava já com mais de 3000 produtos certificados. Rapidamente se assiste à criação dos outros programas de rotulagem por outros países: em 1988 o governo do Canadá cria o seu programa de selo verde, o Environmental Choice; em 1989 o Japão cria o Eco Mark; em 1990 os Estados Unidos criaram o Green Seal, e em 1992 Singapura desenvolve o Green Label. Países como a Índia e a Coreia optaram por programas já existentes como o Eco Mark. Na França surge em 1991 o “NF Environment” pela Associação Francesa de Normalização e Certificação (AFNOR), e os países nórdicos (Noruega, Finlândia, Islândia, Dinamarca e Suécia) criam em 1989 o Cisne Branco (“White Swen” ou Nordic Ecolabel). Na Austrália surge em 2000 o Good Environmental Choice Australia (GECA), enquanto no Brasil é implementada a certificação voluntária de produto designada por selo ecológico Falcão Bauer em 2007 (IFBQ, 2016), entre muitos outros exemplos de rótulos, declarações e programas de rotulagem. Muitos destes programas desenvolvidos sob a influência, sobretudo, dos modelos canadianos e alemães são modelos designados por Mono Criteriosos, uma vez que se apoiam em estudos que contemplam aspetos ambientais relevantes (ex. avaliam procedimentos e práticas, eliminação de uma determinada substância mais poluentes), enquanto o cisne nórdico e o francês se baseiam de uma forma mais integrada na perspetiva de ciclo de vida.

A UE criou um sistema de atribuição de rótulo ecológico europeu (EU Ecolabel) em 1992 revisto em 2000 e alterado em 2010 (Comissão Europeia, 2010b), com o objetivo de se instituir um símbolo único mais eficaz em toda a comunidade europeia, com critérios harmonizados, prevendo no entanto a coexistência de outros esquemas de atribuição independentes (Almeida and Machado, 2009). Por mandato da Comissão Europeia, o European Union Eco-Labeling Board (EUEB) elabora projetos de critérios de atribuição do rótulo ecológico para grupos de produtos, baseando-se em instrumentos como a ACV. O

organismo competente nacional para a atribuição de licenças de utilização do Rótulo Ecológico da União Europeia é a Direção-Geral das Atividades Económicas.

Assim, e face à necessidade de uniformizar a forma e tornar mais clara a abordagem dos rótulos e declarações ambientais foram definidas normas pela ISO e pelo CEN, nomeadamente:

- ISO 14020:2000 - Rótulos e declarações ambientais – Princípios gerais;
- ISO 14021:2016 - Rótulos e declarações ambientais – Autodeclarações ambientais -Rotulagem ambiental Tipo II;
- ISO 14024:1999 - Rótulos e declarações ambientais – Rotulagem ambiental Tipo I – Princípios e procedimentos;
- ISO 14025:2006 - Rótulos e declarações ambientais – Declarações ambientais Tipo III – Princípios e procedimentos;
- ISO 21930:2017 - Sustainability in buildings and civil engineering works - Core rules for environmental product declarations of construction products and services;
- EN 15804:2012+A1:2013 - Sustentabilidade das obras de construção – Declarações ambientais dos produtos – Regras de base para as categorias de produtos de construção;
- EN 15942:2011 - Sustentabilidade das obras de construção — Declarações ambientais de produto — Formato de comunicação empresa-empresa.

Estas normas estão já todas traduzidas e publicadas para português, em anos posteriores à sua publicação em língua oficial inglesa ou francesa (acima mencionados), à exceção da ISO 21930:2017, que ainda não foi traduzida.

Assim, e de acordo com a ISO 14020 (ISO, 2000) os rótulos e declarações ambientais constituem uma das ferramentas da gestão ambiental e fornecem informação sobre um produto ou serviço no que respeita ao respetivo carácter ambiental global, ou a um ou mais aspetos ambientais específicos.

Os rótulos e as declarações ambientais podem ser de três tipos: Rótulos Ambientais, Auto Declarações e Declarações Ambientais de Produto. No entanto, e apesar de terem objetivos semelhantes, nomeadamente, encorajar a oferta e procura de produtos com menores impactes no ambiente, levando a uma melhoria contínua do desempenho ambiental dos produtos no mercado, existem diferenças significativas entre eles como se pode visualizar na Tabela 2.

Tabela 2 – Quadro comparativo dos três tipos de rótulos e declarações ambientais (adaptado de projeto InediC (Almeida, 2011))

	<b>Rótulos Ambientais (Tipo I)</b>	<b>Auto declarações (Tipo II)</b>	<b>Declarações Ambientais de Produto (Tipo III)</b>
<b>Breve definição</b>	Indicam se um produto ou serviço de uma categoria de produto é preferível em relação a outro por ter menor impacto ambiental.	Desenvolvido por fabricantes, distribuidores e outros, para comunicar os aspetos ambientais dos seus produtos ou serviços.	Apresentam informação normalizada sobre o ciclo de vida dos produtos.
<b>Público-alvo</b>	Consumidor	Consumidor	Empresas/Consumidor
<b>Método de comunicação</b>	Rótulo Ambiental	Texto e Símbolo	Declaração de dados ambientais
<b>Informação ambiental</b>	Qualitativa (benefício ambiental global)	Qualitativa (melhoria num aspeto ambiental específico)	Quantitativa (“Perfil ambiental”)
<b>Verificação por terceira entidade independente</b>	Sim	Não é necessária	Sim
<b>Baseado na Avaliação de Ciclo de Vida</b>	Não (podendo basear-se em alguns aspetos)	Não	Sim
<b>CrITÉrios Ambientais</b>	Sim	Não	Não
<b>Categorias de produto</b>	Sim	Não	Sim
<b>Normas</b>	ISO 14024	ISO 14021	ISO 14025 ISO 21930 EN 15804/ EN 15942

De seguida é apresentada uma breve descrição destes três tipos de rótulos e declarações ambientais.

### 3.1.3.1 Declarações ambientais do tipo I – rótulos ambientais

As declarações ambientais do tipo I, também designadas rótulos ambientais, são instrumentos de natureza voluntária, tendo como objetivo indicar que um produto é preferível ambientalmente, podendo ou não incluir ACV. A atribuição do rótulo ambiental para o produto pode ser desenvolvida por uma organização pública ou privada (Silvestre et al., 2010). Este tipo de rótulos é normalizado pela norma ISO 14024 (ISO, 1999), que estipula os princípios e os procedimentos para a criação de programas de rotulagem ambiental, bem como os princípios e procedimentos para a seleção de categorias de produtos, de critérios ambientais e de características funcionais do produto. Nesta norma ainda é referido como deve ser efetuada a avaliação e demonstração da conformidade face

aos requisitos pré-determinados por terceiros (Almeida, 2011), de forma a aumentar a sua credibilidade e transparência.

É de salientar que a informação ambiental fornecida é qualitativa e de fácil comunicação (rótulo) tendo como alvo principal o consumidor, no entanto, tal pode levar a uma perda de informação.

Na Europa destaca-se o Rótulo Ecológico Europeu da União Europeia, existindo diversos grupos de materiais que têm critérios publicados para a atribuição do rótulo ecológico, como sejam revestimentos duros, tintas e vernizes para exteriores, tintas e vernizes para interiores, máquinas de lavar, computadores, etc. De entre estes, destaca-se a publicação da Decisão 2009/607/CE (Comissão Europeia, 2009b), que estabelece os critérios ecológicos para a atribuição do rótulo ecológico comunitário a revestimentos duros para pavimentos e que revogou a anterior Decisão 2002/272/CE da Comissão. O grupo de produtos «revestimentos duros» compreende as pedras naturais, os aglomerados de pedra, as lajes de betão, os mosaicos, os ladrilhos de cerâmica e os tijolos para utilização no interior/exterior, destituídos de qualquer função estrutural de relevo. A nível nacional é de destacar que ainda não existem produtos cerâmicos para revestimentos duros de pavimentos que possuam o rótulo ecológico europeu, existindo porém produtos italianos e espanhóis que já possuem este rótulo europeu. Tal facto poderá estar associado aos exigentes critérios estabelecidos nomeadamente para o desempenho das emissões gasosas durante a cozedura dos ladrilhos cerâmicos (particularmente fluoretos e partículas com teores de concentração muito baixos), mas estes serão testados adiante nesta tese (itens 4.3 e 4.4). Os restantes exemplos de rotulagem tipo I em diversos países foram já expostos no item anterior de enquadramento.

### **3.1.3.2 Declarações ambientais do tipo II – auto-declarações**

As declarações ambientais do tipo II são elaboradas por produtores, importadores ou distribuidores para comunicar informação sobre aspetos ambientais dos seus produtos, através de afirmações, símbolos ou gráficos nos rótulos do produto ou da embalagem ou através de publicidade, sendo o seu alvo o consumidor. Estas declarações são denominadas de auto-declarações e não necessitam de uma verificação externa independente, nem seguem critérios pré-determinados de acordo com a ISO 14021 (ISO, 2016). Neste contexto, a exatidão, a credibilidade e a fiabilidade destas auto-declarações pode ser questionável, o que não acontece em relação às declarações ambientais do Tipo I e III. Têm a vantagem, no entanto, de serem mais económicas, dado que não existem custos de verificação e certificação (Almeida, 2011).

Neste tipo de declaração apenas se considera uma parte do ciclo de vida ou um aspeto ambiental, como por exemplo, a incorporação de conteúdo reciclado ou o consumo reduzido de energia.



É de referir que este tipo de declaração ambiental em nada interfere com qualquer outro tipo de instrumento de comunicação de aspetos ambientais dos produtos ou serviços (ISO, 2016). Exemplos de auto-declarações são:

- Auto-declaração de incorporação de material reciclado - representada pelo anel de Möbius (três setas curvas que formam um triângulo) e uma percentagem (facultativa) no centro que representa a quantidade de material reciclado incorporado no produto.
- Auto-declaração do cumprimento da Diretiva 2004/42/CE do Parlamento Europeu (Decreto-Lei n.º 181/2006) relativamente ao limite de emissões de COV'S (compostos orgânicos voláteis).
- Auto-declaração de reduzida emissão de pó (até 90%) nas fases de mistura, trabalho e aplicação de produtos de cimento (Silvestre et al., 2010).

### **3.1.3.3 Declarações ambientais do tipo III – declarações ambientais de produto**

As declarações ambientais tipo III são também denominadas por declarações ambientais de produto (DAP) (ou em inglês Environmental Product Declaration – EPD) e são ferramentas de comunicação voluntária do desempenho ambiental de um determinado produto numa perspetiva de ciclo de vida. A finalidade global das declarações ambientais é incentivar a procura e a oferta, de produtos que causam menos impacto no ambiente, através da comunicação de informações verificáveis e precisas sobre impactos ambientais dos produtos ao longo do ciclo de vida, estimulando a melhoria contínua do ambiente. São utilizadas na comunicação empresa-empresa (business-to-business), mas podem ser utilizadas na comunicação empresa-consumidor (business-to-consumer).

As declarações ambientais Tipo III seguem a norma ISO 14025 (ISO, 2006c), e apresentam informação ambiental quantificada sobre o ciclo de vida de um produto, seguindo a metodologia da ACV de acordo com a ISO 14040 (ISO, 2006a) e a ISO 14044 (ISO, 2006b), de forma a permitir comparações entre produtos que desempenham a mesma função. A organização necessita de assegurar que esta informação é verificada por uma terceira parte independente.

De mencionar que todos os produtos podem ter uma DAP (tipo III), enquanto os rótulos ambientais do tipo I só são atribuídos a produtos que cumprem no mínimo o desempenho ambiental pré-estabelecido pela entidade a quem compete a atribuição do rótulo. Particularmente no sector da construção, as DAP devem fornecer informação para o bom desenrolar do planeamento e avaliação dos edifícios, e podem também ser utilizadas pelos arquitetos, empreiteiros e outros, para comparar os impactos ambientais de produtos da

construção sob determinadas condições. Neste contexto, as DAPs para produtos de construção podem ser usadas como fonte de informação para a seleção de produtos ou soluções construtivas com base na sua sustentabilidade, bem como pelos sistemas de avaliação de sustentabilidade de edifícios e outras obras de construção. De salientar que o Regulamento de Produtos da Construção – Regulamento EU n.º 305/2011 (Comissão Europeia, 2011b), que entrou em vigor em 2013, contempla uma nova abordagem aos requisitos básicos para as obras da construção e seus produtos, numa lógica de uso eficiente de recursos; no seu requisito 7 preconiza a utilização sustentável dos recursos naturais, clarificando que nessa avaliação deverão ser utilizadas as DAPs, sempre que disponíveis.

As DAPs são feitas com base em regras previamente desenvolvidas denominadas Regras para a Categoria de Produto (RCP), também designadas por PCR (Product Category Rules). Estas são comuns para produtos com as mesmas funções, e consistem num conjunto de requisitos e linhas de orientação específicas, incluindo as escolhas metodológicas para realizar a ACV.

As RCPs e as consequentes DAPs podem ser desenvolvidas no âmbito de um programa de registo de DAP, que é voluntário e contém um conjunto de regras e procedimentos que orientam o seu funcionamento sendo geridas por um operador de programa, através das instruções gerais do programa. A harmonização das instruções gerais do programa, e em particular as RCPs, é incentivada entre programas para satisfazer o princípio de comparabilidade. No Anexo A.2 constam alguns exemplos de operadores de programa, destacando-se o sistema nacional DAPHabitat.

No caso específico dos produtos de construção foram desenvolvidas as normas internacionais ISO 21930 e a EN 15804 que constituem documentos de referência para produtos de construção, sendo que a primeira foi revista e publicada em 2017, e enfoca em princípios e requisitos para o desenvolvimento e implementação de declarações ambientais do Tipo III específicas de materiais e produtos da construção. Por seu lado, a EN15804:2012+A1:2013 (CEN, 2013) constitui uma RCP que está em fase de revisão de forma a alinhar melhor com a pegada ambiental do produto (PAP ou em inglês PEF), de acordo com a Recomendação n.º 2013/179/EU (Comissão Europeia, 2013a), que será abordada no item 3.1.4. Adicionalmente foram publicados a nível europeu uma série de RCPs complementares para produtos de construção específicos como sejam madeira, cimento, betão, etc., que especificam e detalham algumas condicionantes próprias que a ACV e a DAP terão de cumprir mantendo, no entanto, o alinhamento com a norma de base (EN15804+A1) (CEN, 2013).

A EN15804+A1:2013 apresenta uma definição de fronteiras de sistema de acordo com uma estrutura modular própria de produtos de construção que se agrupa em etapas. Ainda segundo esta norma existem três grandes tipologias de DAP, como descrito na Tabela 3.

Tabela 3 – Diferentes Tipologias de DAP de acordo com os módulos de informação incluídos (fonte: adaptado da EN 15804+A1:2013 e DAPHabitat, 2013)

Etapa do Ciclo de Vida	Módulos de informação do Ciclo de Vida	Tipo de DAP		
		"Berço ao portão"	"Berço ao portão com opções"	"Berço ao túmulo"
		Unidade Declarada	Unidade Declarada/ Unidade funcional	Unidade Funcional
<b>A1 – A3</b> <b>Etapa de Produto</b>	<b>A1)</b> Extração e processamento de matérias-primas	Obrigatório	Obrigatório	Obrigatório
	<b>A2)</b> Transporte			
	<b>A3)</b> Produção			
<b>A4 – A5</b> <b>Etapa de Construção</b>	<b>A4)</b> Transporte	-	Opcional	Obrigatório
	<b>A5)</b> Construção e Instalação			
<b>B</b> <b>Etapa de Utilização</b> <sup>2</sup>	<b>B1)</b> Utilização	-	Opcional	Obrigatório
	<b>B2)</b> Manutenção			
	<b>B3)</b> Reparação			
	<b>B4)</b> Substituição			
	<b>B5)</b> Reabilitação			
	<b>B6)</b> Uso de energia (operacional)			
	<b>B7)</b> Uso de água (operacional)			
<b>C</b> <b>Etapa de Fim de Vida</b>	<b>C1)</b> Desconstrução e demolição	-	Opcional	Obrigatório
	<b>C2)</b> Transporte			
	<b>C3)</b> Processamento de Resíduos			
	<b>C4)</b> Eliminação final			
<b>D</b> <b>Benefícios e Cargas ambientais além da Fronteira do Sistema</b>	<b>D)</b> Potenciais de reutilização, recuperação e/ou reciclagem	-	Opcional	Opcional

De acordo com a EN 15804+A1:2013, as categorias de impacto a considerar nas DAP são o aquecimento global, depleção da camada de ozono, acidificação do solo e da água, eutrofização, formação de ozono fotoquímico, depleção de recursos abióticos-elementos, depleção de recursos abióticos-combustíveis fósseis, utilizando como metodologia de AICV

<sup>2</sup> Na Etapa de Utilização (B1-B7) é obrigatório considerar a Vida Útil de Referência

o CML-IA 2001 (Leiden University) (Guinée et al., 2001) com fatores de caracterização atualizados a Outubro de 2012.

As DAPs são também uma ferramenta importante para comunicação de mercado e uma base para ecodesign (Ingwersen and Stevenson, 2012), embora a quantidade de trabalho e competência necessária para realizar uma DAP tenha sido identificada como um grande obstáculo para pequenas e médias empresas (PMEs) (Zackrisson et al., 2008), bem como a falta de alinhamento entre diferentes RCP de diferentes operadores de programa (Passer et al., 2015).

Os aspetos a melhorar no desenvolvimento, registo e promoção de DAPs para materiais de construção incluem:

- aumentar a presença e a visibilidade das DAPs no mercado (ex. seminários, guias interpretativos, etc.) (Santos, 2012; Silvestre, 2012; Silvestre et al., 2010);
- melhorar o uso das DAPs nos processos de tomada de decisão pelas empresas que os produziram e pelos utilizadores (que as recebem) (Santos, 2012);
- alinhar RCPs existentes ou em desenvolvimento que possam permitir comparação consistente de produtos, evitando a duplicação e os custos (Hunsager et al., 2014; Ingwersen and Subramania, 2013; Ingwersen and Stevenson, 2012; Subramanian et al., 2012);
- harmonizar as regras de gestão dos operadores de programa (Del Borghi et al., 2008; Minkov et al., 2015), de forma a minimizar eventuais barreiras de mercado e garantir a consistência;
- desenvolver indicadores apropriados e que cubram um leque de questões ambientais que reflitam o desempenho dos materiais em estudo;
- desenvolver regras para o uso de dados específicos e/ou genéricos (Almeida et al., 2015b; Modahl et al., 2013; Passer et al., 2015);
- facilitar o processo de desenvolvimento de DAPs pelo produtor (ex. desenvolvimento de ferramentas que reduzam os tempos de aquisição e custos de dados secundários, por exemplo bases de dados, guias práticos, software adaptado; registo universal/comum de todas as DAPs; auxílio financeiro às PME) (Del Borghi, 2013; Santos, 2012).

### 3.1.4 Pegada ambiental do produto

Nos últimos anos a difusão de iniciativas de avaliação de pegadas ambientais tem aumentado significativamente, e várias entidades incluindo a Comunidade Europeia considera que esta proliferação poderá não ser benéfica para a adoção de políticas sustentáveis, devido à desconfiança e desorientação que pode gerar junto dos consumidores e também dos custos adicionais que acarreta para as organizações.

Neste contexto, a Comissão Europeia desenvolveu uma série de estudos e documentos, entre os quais se destaca as conclusões do Conselho intituladas «Gestão sustentável dos materiais e produção e consumo sustentáveis» de 20 de dezembro de 2010 (Comissão Europeia, 2013a), que invitavam a Comissão a desenvolver uma metodologia comum para a avaliação dos impactes ambientais dos produtos ao longo do seu ciclo de vida, como ferramenta de sustentação da avaliação e rotulagem dos produtos. Posteriormente são publicados documentos estratégicos como “Uma Europa Eficiente em Termos de Recursos” (Comissão Europeia, 2011a), no âmbito da Estratégia Europa 2020, a comunicação “Construir o Mercado Único dos Produtos Ecológicos – Facilitar uma melhor informação sobre o desempenho ambiental de produtos e organizações” (Comissão Europeia, 2013b) e a Recomendação n.º 2013/179/UE sobre a utilização de métodos comuns para a medição e comunicação do desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida de produtos e organizações (Comissão Europeia, 2013a) que promove a utilização de um conjunto de métodos para o cálculo da PAP (ou PEF em inglês) e da PAO (ou OEF em inglês), sendo estas resultado de um processo complexo de análise e consulta das várias partes interessadas, de forma a aumentar a transparência e a concorrência leal (Bio by Deloitte, 2014; Chomkhamsri and Pelletier, 2011).

Nesta Recomendação sobre a PAP (Comissão Europeia, 2013a), é desenvolvida uma abordagem harmonizada, com base nas normas que versam a ACV como a ISO 14040 (ISO, 2006a), ISO 14044 (ISO, 2006b) e ainda a ISO 14025 (ISO, 2006c), PAS 2050 (BSI, 2011), BP X30-323 (AFNOR, 2011), protocolo GEE desenvolvido pelo WRI/WBCSD, e o Manual do ILCD (EC-JRC, 2012), para cálculo do desempenho ambiental englobando diversos critérios relevantes (multicritérios). De mencionar que não abrange a libertação de emissões gasosas (ex. COV) durante a etapa de uso (Spirinckx et al., 2014).

As metodologias PAP e PAO estão relacionadas com a ISO 14025 e outras normas de pegada ou declarações ambientais, mas existem alguns elementos específicos, tais como:

- para cada grupo de produtos, deve ser desenvolvida uma Regra de Categoria de Produto (RCPAP ou em inglês PEFCRs) e, para cada organização, uma Regra de Sector (RCPAO ou OEFSRs), segundo critérios pré-definidos sujeitos a verificação e comunicação. A RCPAP incluirá parâmetros mais importantes (ex. potenciais categorias de impacto ambiental a considerar, métodos de AICV, qualidade dos dados, etc.), podendo assim reduzir também o tempo, os esforços e os custos

envolvidos no desenvolvimento da PAP (European Commission, 2017). Neste âmbito foram estudados 26 casos piloto, apesar da sua evolução temporal ser distinta, e de nenhum estar relacionado com materiais cerâmicos.

- um dos objetivos da PAP é fazer afirmações comparativas de desempenho ambiental, desde que seja utilizada uma RCPAP, ao contrário das restantes normas como a ISO14025 e a EN15804+A1, que referem que não devem ser usadas afirmações comparativas (ex. superioridade). Para tal prevê a definição de um produto de desempenho médio, seguida de uma classificação de outros produtos em função do seu desempenho em relação ao padrão de referência (Comissão Europeia, 2013a).
- a RCPAP deve especificar o modo como as várias partes são calculadas na fórmula de fim de vida, de forma a tratar de forma uniforme esta etapa, nomeadamente as questões de multifuncionalidade;
- as categorias de impacto e respetivos métodos da PAP são distintas da EN 15804+A1 (Passer et al., 2015);
- os métodos estipulados pela PAP estabelecem requisitos mais específicos e preveem maior consistência matemática, facilitando assim a consistência, comparabilidade e reprodutibilidade do resultado (Manfredi et al., 2015);
- disponibilizar informação como guias metodológicos entre outros para o RCPAP (European Commission, 2017), bem como bases de dados de inventário de ciclo de vida até ao final de 2020, sendo que a esta data já está disponível o referente a energia e transporte;
- prevê-se ainda a disponibilização de materiais em modo de e-learning, bem como ferramentas de software para PMEs.

Finalmente, na Tabela 4 apresentam-se as categorias de impacto, indicadores respetivos e modelos de avaliação do impacto de acordo com o recomendado pela PAP, que servirão de base à metodologia a aplicar nos estudos de caso a desenvolver no capítulo 4.

*Tabela 4 – Categorias de impacto, indicadores de categoria de impacto e modelos de avaliação do impacto para os estudos sobre a PAP (fonte: RC n.º 2013/179/UE)*

<b>Categoria de impacto da PAP</b>	<b>Modelo de avaliação do impacto da PAP</b>	<b>Indicadores de categoria de impacto da PAP</b>
Alterações climáticas	Modelo de Berna – Potencial de Aquecimento Global (PAG) num horizonte de 100 anos	kg de equivalente CO <sub>2</sub>
Destruição da camada de ozono	Modelo EDIP baseado nos PDO da Organização Meteorológica Mundial (OMM) num horizonte temporal infinito	kg de equivalente CFC-11 (*)
Ecotoxicidade para a água doce	Modelo USEtox	CTUe (unidade tóxica comparativa para os ecossistemas)
Toxicidade humana – efeitos cancerígenos	Modelo USEtox	CTUh (unidade tóxica comparativa para o ser humano)
Toxicidade humana – efeitos não cancerígenos	Modelo USEtox	CTUh (unidade tóxica comparativa para o ser humano)
Partículas em suspensão/matérias inorgânicas inaladas	Modelo RiskPoll	kg de equivalente PM <sub>2,5</sub> (**)
Radiações ionizantes – efeitos na saúde humana	Modelo do efeito na saúde humana	kg de equivalente U235 (na atmosfera)
Formação fotoquímica de ozono	Modelo LOTOS-EUROS	kg de equivalente COVNM (***)
Acidificação	Modelo de excedência acumulada	Mol de equivalente H+
Eutrofização - terrestre	Modelo de excedência acumulada	Mol de equivalente N
Eutrofização – aquática	Modelo EUTREND	água doce: kg de equivalente P água do mar: kg de equivalente N
Esgotamento dos recursos – água	Modelo Swiss Ecoscarcy	m <sup>3</sup> de consumo de água em relação à escassez local de água
Esgotamento dos recursos - minerais, fósseis	Modelo CML2002	kg de equivalente antimónio (Sb)
Transformação do solo	Modelo Soil Organic Matter (SOM)	kg (défice)

(\*) CFC-11 = Triclorofluorometano, também denominado freon-11 ou R-11, é um clorofluorocarboneto.

(\*\*) PM<sub>2,5</sub> = Partículas em suspensão com um diâmetro igual ou inferior a 2,5 µm.

(\*\*\*) COVNM = Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos

### **3.2 Estudos de ACV em materiais cerâmicos utilizados na construção**

A ACV tem sido muito utilizada na indústria da construção civil, face aos impactes significativos que este sector tem na economia, no ambiente e na sociedade a nível mundial, estimando-se que seja um dos maiores sorvedouros de recursos e emissor de poluentes. Os estudos de ACV na construção civil são muito diversificados desde ACV a materiais de construção, estudos de gestão de resíduos de construção e demolição (RCD), edifícios e obras de arte, consumo de energia no edifício, sistemas de aquecimento e arrefecimento, etc.

Geng et al. (2017) inventariam 2025 publicações de ACV na construção de 2000 a 2014, das quais 95% foram publicadas em jornais científicos, destacando em termos de temáticas 521 associados ao tema da energia, seguidos de 388 para materiais, 304 na área da sustentabilidade, 299 na área do carbono (e alterações climáticas) e 180 na área das tecnologias construtivas. A comparação destes estudos pode ser limitada uma vez que existem diferenças na metodologia de ACV e seus pressupostos (Cabeza et al., 2014; Chau et al., 2015).

Pini et al. (2014) refere que se estima uma contribuição de cerca de 50% de materiais cerâmicos face aos materiais totais existentes num edifício. Vale, Mateus e Bragança, (2010) referem contributos em termos de impactes ambientais destes materiais num edifício de habitação unifamiliar português de 17% a 24% face ao total, utilizando o Eco-indicator 99, enquanto Amoêda (2009) refere que os resíduos cerâmicos na Europa podem representar até 27% dos resíduos de construção e demolição de um edifício, especificamente 10% de tijolos, 10% de ladrilhos e 7% de telhas. Bribián et al. (2011) referem mesmo que os materiais cerâmicos podem representar cerca de 21,5% do consumo de energia para realizar 1 m<sup>2</sup> de construção em Espanha, sendo os mais relevantes após o aço.

Nos itens seguintes aborda-se o estado do conhecimento sobre ACV de materiais cerâmicos utilizados de um modo ubíquo na indústria de construção civil, tais como tijolo, telha e ladrilhos cerâmicos. Assim, foi efetuada uma pesquisa bibliográfica de publicações e artigos (preferencialmente em revistas com revisão crítica) e DAPs (apenas sectoriais por causa da representatividade dos dados e com revisão crítica), que foram publicados desde 2000 com informações detalhadas nomeadamente sobre a metodologia, fronteiras, categorias de impacto e dados de inventário utilizados. Os estudos com falta de transparência ou informações quantitativas insuficientes não foram incluídos.

É de salientar que existem poucos estudos publicados sobre materiais cerâmicos, provavelmente associados à grande necessidade de dados primários referentes a medições ao longo da cadeia de abastecimento controlados ou influenciados pela organização cerâmica, e por outro lado à sua natureza confidencial (Quinteiro et al., 2014).



### 3.2.1 Tijolo cerâmico

Na literatura, existem estudos de ACV que abordam o tijolo cerâmico, porém nem todos possuem no seu âmbito a realização da ACV ao material tijolo, tendo antes outros objetivos mais latos (ex. desempenho de elementos construtivos como paredes em tijolo e argamassas, desempenho de edifícios, etc.). Assim na Tabela 5, apresenta-se uma síntese dos estudos cujo objetivo específico é a ACV a tijolos cerâmicos, sendo que se segue uma breve descrição onde se apresentam também outros estudos e iniciativas que focam o tijolo cerâmico de forma mais abrangente.

Conforme se pode verificar da análise da Tabela 5, existem estudos de ACV de tijolos cerâmicos em quatro continentes, nomeadamente Europa, América, Ásia e Oceânia, uma vez que estes são utilizados de forma ubíqua. Os tijolos cerâmicos fazem ainda parte de estudos de ACV realizados a diversas soluções construtivas de paredes ou edifícios, inclusivamente em Portugal (Bragança and Mateus, 2011; Monteiro and Freire, 2012; Silvestre, 2012; Silvestre et al., 2015, 2013, 2006). No entanto, os dados do inventário do material de construção constantes destes estudos não são específicos, mas recorrem antes a bases de dados genéricas como a Ecoinvent (de diferentes anos) (Hischier et al., 2010; Kellenberger et al., 2007) ou a dados de inventário publicados anteriormente (Almeida et al., 2010a), uma vez que o objetivo não é o estudo do material cerâmico, mas antes das soluções ou de materiais alternativos, não existindo assim pormenores da ACV do tijolo.

Os estudos de ACV apresentam porém variações na forma de condução da ACV e seus pressupostos metodológicos, aplicando distintas fronteiras do sistema, objetivos, unidade de referência (ou mesmo funcional), métodos de avaliação de impacte, categorias de impacte, entre outras, bem como diferentes tecnologias, por exemplo ao nível da cozedura (ou ausência de informação sobre estas), dificultando assim a sua comparação. Esta dificuldade de comparabilidade é também apontada para outros materiais, nomeadamente os de construção (Chau et al., 2015).

Não obstante estas limitações, efetua-se de seguida uma análise dos referidos estudos, tendo por base critérios como as características tecnológicas e os aspetos metodológicos da ACV (fronteiras do sistema, tempo de vida, unidade funcional e de referência, dados de inventário, métodos de AICV e categorias de impacte, pontos críticos e síntese qualitativa de resultados).

Tabela 5 – Características dos estudos de ACV a tijolo cerâmico considerados na revisão bibliográfica

<b>Autores</b>	<b>Tipo tijolo</b>	<b>Combustível cozedura</b>	<b>Tipo de abordagem de ACV - Fronteiras</b>	<b>Cobertura geográfica</b>	<b>Cobertura temporal dos dados</b>	<b>Tempo vida - Horizonte temporal</b>	<b>Unidade funcional ou de referência</b>	<b>Método AICV</b>	<b>Categorias de impacto estudadas</b>	<b>Ponto crítico (Hotspot)</b>
Koroneos e Dompros (2007)	Baixa massa volúmica com 5,945 kg 17x14x28 cm	Coque de petróleo	Berço ao túmulo	Grécia	n.d.	80	1000 kg	Eco-indicator 95	GWP, AP, EP, Winter smog, Summer smog	Cozedura
Center for Clean Products (2009)	Alta massa volúmica ("face-à-vista") 19x5,7x9,2 cm	Não identificado	Berço ao túmulo	EUA (Tennessee)	n.d.	75	2518 m <sup>2</sup>	Traci e Impact 2002+ (respiratórias)	Energia, AP (H+), ecotoxicidade, EP (kgN), GWP, ODP, POCP (NOx), partículas respiráveis	Cozedura seguida da eletricidade
Rouwette (2010)	Vários incluindo do tipo face-à-vista	Gás natural Várias fábricas	Berço ao portão e berço ao túmulo	Austrália	2007	50	1 unidade e 1 kg	CED IPCC	CED: NRE IPCC: GWP	Cozedura
Bribián (2010); Bribián et al. (2011)	n.d.	Não identificado	Berço ao portão	Espanha	n.d.	n.d.	1 kg	CED IPCC	CED: NRE IPCC: GWP	n.d.
Brick Development Association (2013)	Alta massa volúmica ("face-à-vista") com 2,2 kg 21,5x10x6,5 cm	Gás natural (4 estudos de caso)	Berço ao portão com opção de fim de vida	Reino Unido	2005 (4 empresas)	n.d.	1000 kg	CML-IA	4 estudos de caso a gás natural	CML 2001

Tabela 5 – Características dos estudos de ACV a tijolo cerâmico considerados na revisão bibliográfica (continuação)

Autores	Tipo tijolo	Combustível cozedura	Tipo de abordagem de ACV - Fronteiras	Cobertura geográfica	Cobertura temporal dos dados	Tempo vida - Horizonte temporal	Unidade funcional ou de referência	Método AICV	Categorias de impacto estudadas	Ponto crítico (Hotspot)
Condeixa et al. (2014)	Baixa massa volúmica 29x19x11 cm	Biomassa	Berço ao túmulo	Brasil	n.d.	50	115 m <sup>2</sup>	CML 2001	AP; GWP, EP, FAE; FSE; HT; IR; LU; MA; MAE; MSE; PO; RE; ODP; TE	--
Kumbhar et al. (2014)	Baixa massa volúmica	Biomassa (arroz e bagaço) e carvão (16 empresas)	Berço ao portão	Índia	n.d.	n.d.		Eco-indicator 99	Todas: RI, GWP, AP, EP, ecotoxicidade, radiação, uso do solo, minerais e radiação.	Cozedura e transporte
Almeida et al. (2015)	Baixa massa volúmica com 4,5 kg 30x20x11 cm	Biomassa, coque e gás natural (3 estudos de caso)	Berço ao túmulo	Portugal	2008	50	1 m <sup>2</sup> (71,6 kg)	CML 2001 CED Impact 2000	CML 2001: ADF, GWP, ODP, POCP; AP; EP; AD CED: NRE Impact 2000: RI; WD; PA	Cozedura
Souza et al. (2016)	Baixa massa volúmica com 7,5 kg 39x19x14 cm	Biomassa	Berço ao túmulo	Brasil	2011-2012	40	1 m <sup>2</sup> (97,5 kg)	Impact 2002 + ReCiPe (H)		--

n.d. – não disponível; GWP – aquecimento global; AP – acidificação; EP- eutrofização; ODP – depleção da camada de ozono; POCP - oxidação fotoquímica; ADe - depleção de recursos abióticos – elementos; ADF - depleção de recursos abióticos – fósseis; AD – depleção abiótica; NRE – energia fóssil não renovável; WD- depleção da água; PA – partículas para o ar; RI- partículas respiratórias inorgânicas; IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change; CED – Cumulative energy demand; HT – toxicidade humana; IR –radiação ionizante; LU – uso do solo; FAE – ecotoxicidade aquática; FSE – ecotoxicidade de sedimentos; TE – ecotoxicidade terrestre; MA – odores; MAE – ecotoxicidade aquática ; MSE – ecotoxicidade sedimentos

Da análise dos diversos ACV a tijolo cerâmico verifica-se que:

**a) Tipologia de material e tecnologia de fabrico**

Dos nove estudos de ACV, cinco são de tijolo de baixa densidade (em regra de furação horizontal), três de tijolo de alta densidade (“face-à-vista”) e um dos estudos não especifica o tipo de material.

No que se refere à tecnologia de fabrico, verifica-se que são conformados por extrusão, e cozidos a temperaturas que oscilam entre os 850 a 1100 °C, sendo esta informação no entanto muito escassa nos estudos. Em termos de combustível utilizado verifica-se que utilizam o coque de petróleo na Grécia (Koroneos and Dompros, 2007), biomassa no Brasil (Condeixa et al., 2014; Souza et al., 2015) e Índia (Kumbhar et al., 2014) e gás natural na Austrália (Rouwette, 2010) e também no Reino Unido (BDA, 2014).

Almeida et al. (2015) refere que a tecnologia de forno utilizada é em forno túnel contínuo, porém nenhum dos outros estudos da Tabela 5 refere o tipo de forno. A este respeito importa salientar que Gomes et al. (2012) realizaram a ACV utilizando o método do Eco-indicator 99 para 2 tipologias de tijolos brasileiros de furação horizontal com biomassa (um com forno intermitente e outro em forno túnel), tendo concluído que a tecnologia de forno túnel (mais avançada face ao forno intermitente) apresenta consumos energéticos inferiores e um perfil ambiental mais favorável, não apresentando no entanto valores absolutos de desempenho ambiental (Gomes et al., 2012).

**b) Fronteiras do sistema**

Dos nove estudos, seis seguem a abordagem do berço ao túmulo e três do berço ao portão. Os cenários de fim de vida também não são uniformes, dependendo do local de instalação da obra de construção e mesmo de políticas nacionais. O principal cenário estudado foi a deposição em aterro (Almeida et al., 2015b; Center for Clean Products, 2009; Condeixa et al., 2014; Koroneos and Dompros, 2007; Rouwette, 2010), embora no Reino Unido se tenha estudado um cenário de 50% de reciclagem, 40% de reutilização e 10% de aterro (BDA, 2014). Todos os estudos de ACV que incluem o fim de vida realçam a possibilidade de reciclagem desta tipologia de material.

**c) Tempo de vida**

Verifica-se que o tempo de vida oscila entre os 40 anos (Souza et al., 2016) e os 80 anos (Koroneos and Dompros, 2007), fundamentado no tempo de vida do edifício ou da solução construtiva. Mais se refere que dois estudos não apresentam o tempo de vida conforme se pode constatar da análise da Tabela 5. Esta variabilidade poderá ser explicada pela tipologia e objetivos da ACV e sua integração no contexto do edifício ou da solução construtiva (ex.

paredes exteriores) e porque não existem regras claras para definir como calcular o tempo de vida de materiais de construção (Kotaji et al., 2003).

### **d) Unidade funcional e de referência**

A unidade funcional definida nos diversos estudos apresentados na Tabela 5 foi muito diversa em função do contexto e objetivos do estudo, o que dificulta a comparação dos resultados pois nem sempre são cedidos elementos adicionais que permitam a conversão de valores. Alguns estudos apresentam o peso do tijolo ou da parede sendo possível converter para uma unidade de referência de massa (seis dos nove estudos).

### **e) Dados de inventário**

É possível constatar diferentes níveis de detalhe e mesmo “maturidade” face aos inventários existentes, sendo que uma parte significativa dos estudos não detalha os dados de inventário (entradas e saídas), nem a qualidade do mesmo. Por exemplo a embalagem apenas aparece de modo explícito num número reduzido de estudos (Almeida et al., 2015b; Souza et al., 2016).

Quatro dos nove estudos de caso dizem respeito a várias fábricas, três a dados de apenas uma fábrica e os dois restantes não identificam. Alguns dos dados específicos refere-se a médias anuais, abrangendo os anos de 2005 a 2012, embora existem cinco estudos que não identificam o(s) ano(s) do inventário.

### **f) Método de AICV e categorias de impacte**

Todos os estudos incluem as categorias de impacte associadas às alterações climáticas e à depleção de recursos fósseis (também designado por alguns autores como “consumo de energia”), evidenciando a importância do consumo energético e consequentes emissões de gases com efeito de estufa (e outras) deste material, bem como a importância do tema das alterações climáticas a nível mundial. Os valores de conversão recomendados pelo IPCC (IPCC, 2016) para o potencial de aquecimento global de cada gás são usados na quantificação do impacte associado às alterações climáticas em quase todos os estudos, embora haja diferenças nos valores adotados, que foram evoluindo ao longo do tempo.

Os métodos mais utilizados foram o CML (Almeida et al., 2015b; BDA, 2014; Condeixa et al., 2014), mais associado a estudos europeus, bem como o IMPACT 2000 e IMPACT 2002+ (Almeida et al., 2015b; Center for Clean Products, 2009; Souza et al., 2016), mais associados a estudos americanos; e ainda em dois estudos o Eco-indicator (versão 95 e 99). O Cumulative Energy Demand (CED) (Huijbregts et al., 2006), indicador energético, foi

também utilizado em três estudos que incluíram também as alterações climáticas evidenciando a sua correlação.

No estudo mais recente (Souza et al., 2016) foi utilizado o método IMPACT 2002+ (versão Q2.2), tendo sido efetuada uma análise de sensibilidade com o ReCiPe (H) (Goedkoop et al., 2009), concluindo-se que, para a maioria das categorias de impacto em estudo, as conclusões são semelhantes com a exceção do uso do solo e do consumo de água quer para o tijolo de cerâmica quer para o de betão (Souza et al., 2016), explicado pelos diferentes fatores de caracterização. O método ReCiPe (H) (Goedkoop et al., 2009; Huijbregts et al., 2017) considera a transformação do solo enquanto o Impact 2002+ caracteriza apenas a ocupação do solo.

Neste item destaca-se ainda um estudo distinto dos apresentados na Tabela 5 que compara três métodos de AICV (Eco-indicator 99, CED e CML 2001) em sete cenários de paredes exteriores com dados genéricos de materiais como tijolos de furação horizontal, tijolos face à vista, blocos de cimento e madeira (Monteiro and Freire, 2012). O aquecimento global, a depleção da camada de ozono, a depleção abiótica de recursos fósseis, a acidificação e a eutrofização apresentam resultados robustos que permitem uma comparação direta entre os dois métodos AICV - CML 2001 e Eco-indicator 99. Além disso, os resultados pelo CML apresentam impactos ligeiramente maiores para a etapa de uso, enquanto Eco-indicator 99 apresenta-os para a produção de material. Porém, estes dois métodos AICV apresentam resultados inconsistentes para toxicidade humana, eco-toxicidade e oxidação fotoquímica, ou seja, uma classificação diferente das paredes alternativas, o que, em última instância, pode influenciar a escolha entre as soluções.

#### **g) Ponto crítico (“hotspot”)**

A etapa do berço-ao-portão é a mais significativa (com mais de 50%) para a maioria das categorias de impacto analisadas nos diversos estudos de ACV da Tabela 5 devido principalmente ao consumo de energia na fábrica no processo de cozedura (ponto crítico) (Almeida et al., 2015b; BDA, 2014; Condeixa et al., 2014; Koroneos and Dompros, 2007; Rouwette, 2010; Souza et al., 2016). Koroneos e Dompros (2007) referem ainda que após a cozedura, destaca-se a produção da eletricidade (utilizada ao longo de todo o processo de fabrico) e os transportes. Por outro lado, Almeida et al. (2015) e BDA (2014) destacam que a depleção de recursos abióticos elementos (ADPe) está relacionada com a extração de recursos abióticos do ambiente (minérios, minerais, etc.) que são utilizados particularmente na produção de eletricidade (mix elétrico).

Em regra, para o aquecimento global e para a depleção da energia, a etapa de fabrico representa 70 a 85%, enquanto a extração de matérias-primas e seu transporte representam menos de 3 a 5%, o transporte para o edifício cerca de 4 a 5%, a construção cerca de 2 a 8% (atendendo às perdas de material e argamassa de assentamento) e a

deposição final (aterro) cerca de 5 a 10% (Bribián, 2010; Bribián et al., 2011; Condeixa et al., 2014; Koroneos and Dompros, 2007; Rouwette, 2010; Souza et al., 2016). Este comportamento é distinto porém para a depleção de recursos fósseis quando a biomassa é utilizada como combustível de cozedura (Almeida et al., 2015b; Souza et al., 2016), pois é uma fonte renovável (logo não incluída neste indicador).

Bribian (2010), para além das categorias de depleção de recursos fósseis (segundo CED), e do aquecimento global estudou ainda o consumo de água, numa ACV efetuada com base em dados da Ecoinvent 2 e o mix elétrico de Espanha de 2008, tendo concluído que representa 64% na etapa do berço ao portão; 8% no transporte; 16% na construção e 13% na deposição final (aterro), referindo ser uma lacuna a ausência de métodos harmonizados para este parâmetro que considera relevante na construção. Já para Almeida et al. (2015) a etapa de construção foi a mais representativa com 63-64% para a depleção da água, seguida da etapa de fim de vida com 24-25%. Tais diferenças poderão ser atribuídas a diferentes métodos de cálculo desta categoria e a distintos pressupostos na etapa de construção, enquanto Almeida et al. (2015) discrimina como foi realizada a argamassa e a etapa de construção, Bribián et al. (2010) não o faz.

Também na ACV de tijolo na Índia, Kumbhar et al. (2014) concluíram que a acidificação, a eutrofização e o efeito de estufa são relevantes, e fortemente influenciadas pela combustão com carvão no processo da cozedura que emite grandes quantidades de partículas e dióxido de enxofre, apresentando porém os resultados normalizados com o método do Eco-indicator 99. A operação de secagem é efetuada por exposição ao sol (prática não utilizada na Europa, que dispõe de secadores automáticos). Mencionam ainda que se trata de um sector ainda pouco mecanizado, com recurso a muito trabalho humano, muito distinto do usual nos países europeus (mecanizado e com poucos recursos humanos).

No que se refere à integração do tijolo no cenário da casa familiar, as conclusões de Rouwette (2010), Condeixa et al. (2014) e Souza (2016), são distintas uma vez que durante a etapa de uso (50 anos) o consumo energético e as consequentes emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são significativas face às necessidades de climatização da casa, iluminação, aquecimento de águas quentes sanitárias, etc., pelo que o impacto do tijolo e argamassa representam cerca de 2% a 10% no aquecimento global, em função dos cenários (incluindo as especificidades locais e pressupostos de uso de energia). A etapa da extração até à construção e a etapa de fim de vida representam cerca de 20%, enquanto a etapa de uso /manutenção é responsável pela maioria dos impactes ambientais determinados (cerca de 60%) (Condeixa et al., 2014). Estes autores justificam este comportamento com as reformas necessárias ao longo do tempo útil de vida do edifício que, induzem quer a extração, o transporte, o fabrico e o uso de novos materiais (e consequentes resíduos), considerando que no Brasil estas reformas são necessárias devido à fraca qualidade da construção

(induzida pela fraca qualificação de mão-de-obra), clima húmido do Rio de Janeiro, e ainda questões culturais que tendem a fazer muitas reformas na disposição dos quartos.

#### **h) Variáveis que podem afetar os resultados**

Neste item efetua-se uma breve descrição de variáveis que podem ter influência nos resultados da ACV a tijolo cerâmico.

Assim, a redução de consumo energético na cozedura (“hotspot”) por adição de agregados leves (com 85% de argila e 15% de biomassa como agente de porosidade) reduziu o impacto da depleção de recursos fósseis e das alterações climáticas por exigir menor consumo energético na cozedura e a biomassa ser considerada neutra em termos de emissões de CO<sub>2</sub> (Bribián et al., 2011).

Souza et al. (2016) realizaram uma análise de sensibilidade e de incerteza a três tipos diferentes de paredes comuns no Brasil: tijolos cerâmicos, tijolos de betão e paredes exteriores de betão armado (efetuado no local), concluindo que o tempo de vida útil das paredes, a areia artificial, a embalagem (ou sua ausência), os cenários de perdas/quebras de tijolos e argamassas, não afetam de um modo significativo. Já o aumento do raio de distribuição de transporte tem um impacto significativo, nomeadamente para a Saúde.

Adicionalmente, é de referir o estudo berço ao portão realizado a 28 materiais de construção (Lasvaux et al., 2015), entre os quais o tijolo, usando as categorias e indicadores de AICV do CML 2001 (Guinée et al., 2001) preconizados na EN15804+A1 (CEN, 2013) e com vista a comparar os dados genéricos da Ecoinvent com os dados específicos de DAP tipo III registados no sistema francês (INIES, 2016). Os resultados globais indicam desvios de diferentes magnitudes dependendo dos indicadores de AICV e dos materiais de construção:

- desvios entre 0 e 30% para aquecimento global, depleção de recursos fósseis, energia (CED);
- desvios entre 31 e 100% para acidificação e uso de água fresca;
- desvios entre 101 e 250% para a depleção de recursos elementos, resíduos e poluição do ar;
- desvios acima de 250% para oxidação fotoquímica e resíduos radioativos, com a média da DAP superior ao da base genérica.

Estes autores presumem que estes desvios, se podem justificar atendendo a distintas definições de fronteiras, nível de detalhe do inventário, nomenclatura, detalhes dos materiais de construção representatividade dos dados (geográfica, temporal, tecnológica), mix elétrico de cada país, alocação de co-produtos distinta, eventual influência das medições, uso de diferentes quantidades de matérias-primas, infraestruturas,



extrapolações de bases genéricas (Lasvaux et al., 2016, 2015). Existe ainda a necessidade de se investigar e detalhar melhor as questões metodológicas na aplicação da ACV de tijolos cerâmicos (Almeida et al., 2015b; Haddad et al., 2013).

Neste contexto, pode-se inferir que os resultados da ACV de tijolos podem variar em função dos dados de inventário e cenários de uso, mas também devido a escolhas metodológicas e normativas nos procedimentos de modelação.

Nenhum dos estudos anteriormente referidos avaliou o efeito no ambiente do uso de diferentes combustíveis no fabrico duma mesma tipologia de tijolo cerâmico, nem avaliações consistentes de melhorias de desempenho face a tecnologias ambientalmente preferíveis, nem tão pouco estratégias de economia circular, nem as diferentes opções de fim de vida, nem o efeito da variação das regras no cálculo da ACV (critérios de corte ou procedimentos de alocação, etc.), ou mesmo a evolução temporal de impactes.

### **3.2.2 Telha cerâmica**

No que concerne à telha cerâmica, os estudos de ACV encontrados na bibliografia científica são em número reduzido, provavelmente atendendo à multiplicidade de soluções de revestimentos para coberturas com base em outros materiais, desde as mais clássicas inclinas, até às coberturas planas e mais recentemente coberturas verdes. No entanto, na Europa e em particular em Portugal, a telha cerâmica é uma das soluções de cobertura mais usada, com diversos formatos e dimensões. Os produtores de telha são no entanto relativamente reduzidos e muitas vezes concentrados em grandes grupos, pelo que as questões de confidencialidade aliadas à grande necessidade de dados primários referentes a medições (Quinteiro et al., 2014) poderão ser condicionantes para a reduzida publicação de estudos de ACV para este material.

Na Tabela 6 são sintetizados os principais estudos de ACV para a telha cerâmica.

Conforme se pode analisar da Tabela 6, o principal objetivo dos diferentes estudos de ACV é para fins comparativos entre diferentes materiais construtivos (Bribián et al., 2011; Gensch and Liu, 2008; Kuruppuarachchi et al., 2014; Souza et al., 2015). Assim, a comparação entre distintos estudos de ACV da telha cerâmica é difícil pois existem variáveis metodológicas distintas como sejam a unidade funcional, a fronteira do sistema, fontes de dados, métodos de avaliação, categorias e indicadores de impacto ambiental, metodologias de avaliação de impacto ambiental, entre outras, bem como diferentes tecnologias de fabrico (ou ausência de informação sobre estas).

Tabela 6 – Características dos estudos de ACV a telhas cerâmicas considerados na revisão bibliográfica

Autores	Fronteira	Cobertura geográfica	Ano de recolha de dados	Tipo conformação e combustível	Unidade funcional	Representatividade	Tempo vida	AICV: métodos e categorias de impacte	Ponto crítico ( <i>Hotspot</i> )
Gensch and Liu (2008)	Berço ao portão e distribuição	Alemanha	2006	Prensagem Gás natural	160 m <sup>2</sup>	Mesmo grupo com locais na Alemanha (cerâmica)	30	CED: ENR; CML2001: GWP; AP; EP; POCP; e partículas respiráveis (PM10)	Cozedura (maioritário) seguido da eletricidade na fabricação
Bribián, 2010 Bribián et al. (2011)	Berço ao túmulo. Distrib. (100 km)	Espanha	n.d. mix elétrico de 2008	Prensagem Gás natural	1 kg	Inventário genérico Espanha	n.d.	CED: ENR, IPCC (2007): GWP Eco-indicator 99: “pegada da água”	Cozedura
Cellura et al. (2011)	Berço ao túmulo. Distrib. (100 km)	Itália	2005	Artesanal (manual) Biomassa	1000 kg	Telhas sicilianas (restauro de edifícios)	n.d.	CED: ENR, CML 2 (2000): GWP; AP; EP; ODP; POCP	Energia: Cozedura mais de 80%. GWP: transporte (46%)
Fédération Belge de la Briquerie (2012)	Berço ao túmulo	Bélgica	n.d. (<2012)	Extrusão e Prensagem Gás natural	1000 kg	Média de 10 empresas da Bélgica da associação BBF	150	Indicadores da EN15804+A1:2013 CML2001: todas as categorias	n.d.
Kuruppuarachchi et al. (2014)	Berço ao portão	Sri Lanka	n.d. (<2014)	Extrusão e Prensagem Biomassa	1 pé quadrado	Dados locais	100	Eco-indicator 99	Eletricidade consumida na fabricação
Souza et al. (2015)	Berço ao túmulo. Distrib. (120 km)	Brasil	2010/ 2011	Extrusão e Prensagem Biomassa	1 m <sup>2</sup> (38,4 kg/m <sup>2</sup> )	Dados locais. Comparação com telhas de cimento	20	Impact 2002+:todas as categorias ReCiPe: todas	Cozedura, principalmente para associadas a PM.
Vieira (2016)	Berço ao portão	Portugal	2013	Extrusão e Prensagem Gás natural	1 m <sup>2</sup> (37,8 kg/m <sup>2</sup> )	Dados de um fabricante	35	ILCD +: todas as categorias	Cozedura

n.d. – não disponível; AP - acidificação; CED – cumulative energy demand; Distrib. – distribuição; ENR – energia não-renovável; EP – eutrofização; ET – ecotoxicidade; GWP- aquecimento global; IPCC - Intergovernmental panel on climate change; ODP – depleção da camada de ozono; PM – partículas; POCP – oxidação fotoquímica.

Apesar das limitações apontadas, apresenta-se uma análise por parâmetros, nomeadamente:

### **a) Tipologia de material e tecnologia de fabrico**

No que se refere à tecnologia de fabrico, verifica-se que a maioria é conformada por extrusão seguida de prensagem, existindo uma referência a fabrico manual (ou fabrico artesanal) (Cellura et al., 2011). A informação sobre o formato e peso da telha é no entanto muito escassa nos referidos estudos. Em termos de combustível utilizado no fabrico (nomeadamente nas operações térmicas de secagem e cozedura), verifica-se que utilizam o gás natural ou a biomassa. Nos países europeus e com maior grau de mecanização utilizam o gás natural à exceção das telhas conformadas de modo manual em Itália (Cellura et al., 2011). A biomassa é utilizada no Sri Lanka (Kuruppuarachchi et al., 2014) e no Brasil (Souza et al., 2015).

Estas opções refletem o contexto atual mundial, com os países desenvolvidos a utilizar o gás natural associado a tecnologias mais avançadas para garantirem os padrões de qualidade para o produto final (incluindo os estéticos), sendo este combustível ainda a MTD deste subsector, enquanto nos países em desenvolvimento se podem utilizar outras tipologias de combustíveis.

### **b) Fronteiras do sistema**

De mencionar que três estudos seguem a abordagem do berço ao túmulo e os restantes quatro do berço ao portão (sendo que dois incluem ainda a etapa de distribuição).

Os cenários de fim de vida também não são uniformes, dependendo do local de instalação da obra de construção e mesmo de políticas nacionais. Assim, foi estudado o cenário da deposição em aterro (Bribián et al., 2011; Souza et al., 2015), embora no Reino Unido se tenha estudado um cenário de 95% de reciclagem/reutilização e 5% de aterro (FBB, 2012). Tal como para o tijolo, também para a telha se verifica a possibilidade de reciclagem desta tipologia de material em fim de vida para outras finalidades (campos de ténis, pistas de cross, incorporações em outros materiais de construção, misturas pozolânicas (Lavati et al., 2009), entre outros), promovendo estratégias de economia circular.

### **c) Tempo de vida**

Nos estudos de ACV em análise, o tempo de vida varia entre os 20 anos (Souza et al., 2015) e os 150 anos (FBB, 2012). Sendo que o menor tempo é justificado por razões de ordem estética e de renovação (Souza et al., 2015), enquanto os restantes tempos são fundamentados apenas com base no tempo de vida do edifício (ou seja sem determinação

da durabilidade do material) ou da solução construtiva (quando tem a finalidade de comparar entre soluções construtivas).

#### **d) Unidade funcional e de referência**

A unidade funcional dos diversos estudos de ACV da Tabela 6 é definida por área (m<sup>2</sup> ou pé quadrado) ou por massa (quilograma).

#### **e) Dados de inventário**

Tal como para o tijolo, os dados de inventário nem sempre são explícitos ou apresentados com um nível de detalhe suficiente, podendo mesmo referir-se que praticamente metade dos estudos da Tabela 6 não apresentam inventário (Bribián et al., 2011; FBB, 2012; Gensch and Liu, 2008).

Por outro lado, a maioria dos estudos refere-se a dados de médias de várias fábricas e representativos da região geográfica, à exceção do estudo italiano que se refere apenas a um produto tradicional artesanal (Cellura et al., 2011) e do estudo português que se refere a uma unidade industrial (Vieira, 2016). A grande maioria dos dados específicos refere-se a médias anuais, porém três dos sete estudos não identificam o(s) ano(s) do inventário em concreto.

#### **f) Método de AICV e categorias de impacto**

O método de AICV é também diverso, sendo que o mais utilizado foi o CML e o CED, embora com versões distintas ao longo dos anos face a evoluções nos fatores de caracterização. Estes métodos foram utilizados em todos os estudos europeus, já no Brasil foi utilizado o IMPACT 2002+ e o ReCiPe (Souza et al., 2015), enquanto no Sri Lanka foi usado o Eco-indicator (versão 99). A aplicação prática da PAP seguiu o método do ILCD conforme mencionado na Recomendação n.º 2013/179/EU (Comissão Europeia, 2013a), numa abordagem do berço ao portão (Vieira, 2016).

As categorias de impacto como o aquecimento global e a depleção de recursos fósseis estão presentes em todos os estudos, evidenciando também a importância destas categorias de impacto para este material e o contexto político europeu, nomeadamente os objetivos para a Europa 2020 (Bribián, 2010). No entanto, foram também testadas todas as categorias de impacto do IMPACT 2002+ e do ReCiPe por Souza et al. (2016), sendo mesmo de destacar que foi efetuada uma análise de sensibilidade com o ReCiPe (H) (Goedkoop et al., 2009). Nesta análise de sensibilidade verificou-se que as conclusões são semelhantes, para a maioria das categorias de impacto em estudo, contudo obtiveram-se resultados ligeiramente inferiores na categoria do aquecimento global, explicadas pelos diferentes fatores de caracterização.

### **g) Ponto crítico (“hotspot”)**

Os principais impactes ambientais estão diretamente relacionados com os recursos energéticos (combustíveis fósseis e eletricidade) quer no processo de fabrico quer nos transportes. Os efeitos das partículas surgem associados à queima de biomassa.

Neste contexto, a etapa do berço-ao-portão assume-se como a mais significativa (com mais de 50%) para grande parte das categorias de impacto analisadas nos diversos estudos de ACV devido principalmente ao consumo de energia na fábrica no processo de cozedura (ponto crítico). Assim, para o consumo de energia (“CED”) e para o aquecimento global, a etapa do berço ao portão pode significar 75 a 87% nas fábricas alimentadas a gás natural (Abd Rashid and Yusoff, 2015; Bribián, 2010; Bribián et al., 2011; Gensch and Liu, 2008) (Bribián, 2010; Bribián et al., 2011; Gensch and Liu, 2008), e ainda cerca de 77% para a depleção da água (Bribián, 2010). As restantes etapas representam menos de 12%.

Os resultados são porém distintos nos estudos com a biomassa (Cellura et al., 2011) como combustível (considerado neutro em termos de emissão de CO<sub>2</sub>), verificando-se que o transporte é o maior contribuinte para o aquecimento global (cerca de 46%), seguindo-se a preparação de pastas, conformação e secagem com 24%, a cozedura com 15%, e a embalagem e a extração de argila com 10% e 5%, respetivamente. No caso da ACV da telha cerâmica produzida no Sri Lanka (Kuruppuarachchi et al., 2014), principal material de cobertura utilizado nesse país, verificou-se que todas as categorias de impacto determinadas pelo Eco-indicator 99 são afetadas principalmente pelo uso de energia, nomeadamente a eletricidade (o mix elétrico é muito influenciado pelo gásóleo). O uso de biomassa como combustível do forno também apresenta um contributo importante, embora em menor escala, sendo muito relevante na desflorestação do ecossistema e nas categorias associadas a efeitos respiratórios (atendendo à cinza).

Vieira (2016) refere que o subsistema de produção de telha, alimentado a gás natural, é o mais relevante para a maioria das categorias de impacto avaliadas no estudo, exceto: toxicidade humana – efeitos cancerígenos, radiações ionizantes; eutrofização - aquática (água doce) e ecotoxicidade, onde o processo da embalagem é o mais relevante.

### **h) Variáveis que podem afetar os resultados**

Neste item efetua-se uma identificação de variáveis que podem ter influência nos resultados da ACV.

O estudo italiano sobre ACV de telhas sicilianas, explora várias fontes de incerteza da ACV, principalmente devido a escolhas metodológicas, pressupostos iniciais, regras de alocação, fronteiras do sistema, métodos de AICV e a qualidade dos dados disponíveis (Cellura et al., 2011). A análise de sensibilidade abordou diferentes alternativas de transporte, mix elétrico, dados distintos para as emissões da cozedura a biomassa, métodos de AICV (EPD

2008; CML 2 e Eco-indicator 95, EDIP, Impact 2002+), e concluiu que as variações podem ser de pouco significativas (na ordem dos 2,5%) até muito significativas (433% para o caso do mix elétrico e das emissões de biomassa). Já para o uso de distintos métodos de AICV, o aquecimento global apresenta variações mais reduzidas (2,5%), enquanto a oxidação fotoquímica pode atingir os 86%.

Mais recentemente, Souza et al. (2015), no estudo comparativo de ACV a telhas cerâmicas e em cimento, efetuaram uma análise de sensibilidade a alguns parâmetros considerados mais críticos como vida útil, materiais (argilite, areia e cimento), cenários de distribuição, embalagens, métodos de AICV, método de alocação, tendo concluído que as variações significativas foram:

- o transporte para um raio de distribuição de 120 km, onde o impacto na "Saúde Humana" seria significativamente maior para telhas cerâmicas (30% para o parâmetro - inorgânicos respiratórios);
- o uso de dados de inventário do cimento da Associação de Cimento do Canadá origina um acréscimo de 10% na "Saúde Humana";
- o método do ReCiPe, para as categorias de danos "Saúde Humana" e "Qualidade do Ecossistema", onde a contribuição das telhas de cimento se relevou muito maior.

De salientar que nenhum destes estudos de ACV efetuou avaliações consistentes de melhorias de desempenho face a tecnologias ambientalmente preferíveis, nem a diferentes opções de técnicas de fabrico ou de fim de vida nem a implementação de estratégias de economia circular. Também a evolução temporal de impactes não consta em nenhum dos estudos.

### **3.2.3 Ladrilhos cerâmicos**

Os ladrilhos cerâmicos são a tipologia de produtos cerâmicos onde se registam mais estudos de ACV, sendo no entanto uma tipologia de produto com diversas aplicações e funções (pavimento ou revestimento), que compreende uma grande variedade de tamanhos, espessuras, acabamentos decorativos e distintas matérias-primas na sua composição em função do tipo de produto que se pretende.

Na Tabela 7 apresenta-se um resumo dos estudos científicos existentes que abordam a ACV a ladrilhos cerâmicos.

Tabela 7 – Revisão bibliográfica de vários estudos de ACV a ladrilhos cerâmicos (fonte: adaptado de Almeida et al., 2016 e Rós-Dosdá et al., 2017)

Autores	Fronteira	Cobertura geográfica	Ano de recolha de dados	Tipo ou composição do ladrilho	Unidade funcional	Representatividade	Tempo vida	AICV: categoria de impacto	Ponto crítico ( <i>Hotspot</i> )
Nicoletti et al., 2002	Berço ao túmulo	Itália (Sassuolo)	n.d. (anterior a 2002)	Ladrilho vidrado por monocozedura (18 kg/m <sup>2</sup> )	1 m <sup>2</sup> de pavimento por um período de 40 anos	Diversas empresas italianas	20	CML 1992: ADP; GWP; ODP; HT; ECA; AP; POCP; EP	Processo de cozedura (36% GWP e 41% de AP). Metais dos vidrados (HT)
Asif et al., 2007	Berço ao portão	Escócia	n.d.	n.d.	Não explicita	Material integrado num edifício residencial. Não apresenta inventário	n.d.	Método não explícito: Energia e emissões de CO <sub>2</sub>	n.d. Os materiais cerâmicos representam 15% da energia total de um edifício sendo o cimento o principal contribuinte (60%)
Bovea et al., 2010	Berço ao portão com cenários de distribuição	Espanha (Castellon)	2004–2006 – dados próprios 2007 – mix elétrico espanhol	Pavimento e revestimento (pasta de base vermelha)	1 m <sup>2</sup> de ladrilho fabricado e pronto a vender	Várias empresas espanholas	n.d.	CML 2001: ADP; GWP; ODP; AP; EP; POCP Indicador adicional de ruído: dBA	Combustão de gás natural na cozedura e atomização, exceto ODP onde é a produção da eletricidade. Prensagem e linhas de vidrar para o ruído
Bribián 2010 e Bribián et al., 2011	Berço ao portão	Espanha	2008	Pavimento diverso em monocozedura em ciclo parcial	1 m <sup>2</sup>	Uma empresa espanhola	n.d.	CED: ADf IPCC: GWP Pegada da água	Combustão de gás natural na cozedura para ADf e GWP. Produção de eletricidade para a pegada da água
Tikul and Srichandr, 2010	Berço ao portão	Tailândia	Março de 2008 a Fevereiro de 2009	Não especificado – pavimento em dupla cozedura	1 megagrama (Mg) de ladrilho base vermelha ou branca, com 10,57 kg/m <sup>2</sup>	Uma empresa com tecnologia de dupla cozedura	n.d.	EDIP: fossil fuel impact; GWP; ODP; ET; HT Eco-indicator 99: todas	Cozedura e transportes das matérias-primas

Tabela 7 – Revisão bibliográfica de vários estudos de ACV a ladrilhos cerâmicos (fonte: adaptado de Almeida et al., 2016 e Rós-Dosdá et al., 2017) (continuação)

Autores	Fronteira	Cobertura geográfica	Ano de recolha de dados	Tipo ou composição do ladrilho	Unidade funcional	Representatividade	Tempo vida	AICV: categoria de impacte	Ponto crítico ( <i>Hotspot</i> )
Ibáñez-Forés et al., 2011	Berço ao túmulo, exceto a etapa de uso	Espanha	2009	Grés porcelânico vidrado	1 m <sup>2</sup> de ladrilho por um período de 20 anos	35 empresas espanholas	20	CML 2001: ADP; GWP; ODP; AP; EP; POCP; HT	Etapa de fabrico (processo de cozedura), seguida da etapa de distribuição do produto
Benveniste et al., 2011	Berço ao túmulo, exceto reparação, substituição e reabilitação	Espanha	2008	3 tipologias mais comuns: Grés porcelânico (AA ≤ 0.5%); Pavimento vidrado 0.5% < AA ≤ 10%; Monoporosa (AA > 10%)	Revestimento de 1 m <sup>2</sup> de superfície (chão ou parede) no interior de uma casa durante 50 anos para uso residencial ou comercial	56 empresas espanholas (representam mais de 50% da produção espanhola)	50	CML 2001: ADP; GWP; ODP; EP; AP; POCP; consumo de energia primária e consumo de água	Etapa de fabrico como a mais significativa para a maioria das categorias, exceto a POCP, EP e consumo de água, onde a etapa de uso é a mais relevante
Ibáñez-Forés et al., 2013	Berço ao portão	Espanha	2009	Grés porcelânico vidrado	1 m <sup>2</sup> de ladrilho	35 empresas espanholas	20	CML 2001: ADP; GWP; ODP; AP; EP; POCP; HT	Etapa de fabrico - processo de cozedura e secagem por atomização (realizado muitas vezes noutra unidade industrial)
Ruschi et al., 2014	Berço ao portão	Brasil	n.d.	Ladrilho cerâmico genérico	1 m <sup>2</sup> de área de pavimento	Não apresenta inventário. Ecoinvent v.2.2.	n.d.	CML2001: GWP. ICV: energia incorporada; Pegada água azul; minerais não renováveis; COVs	n.d. O objetivo foi efetuar uma compilação de resultados que possam funcionar como benchmark para 12 materiais de construção no Brasil



Tabela 7 – Revisão bibliográfica de vários estudos de ACV a ladrilhos cerâmicos (fonte: adaptado de Almeida et al., 2016 e Rós-Dosdá et al., 2017) (continuação)

Autores	Fronteira	Cobertura geográfica	Ano de recolha de dados	Tipo ou composição do ladrilho	Unidade funcional	Representatividade	Tempo vida	AICV: categoria de impacte	Ponto crítico ( <i>Hotspot</i> )
Pini et al., 2014	Berço ao túmulo (exceto a etapa de instalação e uso). Distribuição (raio de 100 km)	Itália	2008	Grés porcelânico fino reforçado com fibra de vidro (3,5 mm espessura, 8,2 kg/m <sup>2</sup> )	1 m <sup>2</sup> de ladrilho fino de formato grande (1000x3000x3,5 mm) reforçado com fibra de vidro	Um produtor italiano (Emilia Romagna)	n.d.	IMPACT 2002+: Human health; Ecosystem quality; GWP; Resources; Single score (Pt)	Partículas respiratórias inorgânicas (transportes MP, atomização, produção de adesivo para colagem da fibra) GWP e ENR – cozedura, seguido da preparação de pasta, fabrico do adesivo (poliuretano) e transportes
Belussi et al. 2015	Berço ao portão	Itália	2012	Protótipo de ladrilho cerâmico fotovoltaico	1 m <sup>2</sup> painel	Protótipo (dados próprios) e Ecoinvent 2.2. Não apresenta inventário	n.d.	CML 2001: ADe; ADf, POCP, GWP, AP, EP, ODP	A etapa da funcionalização (deposição de finas camadas de silício amorfo). A produção do ladrilho cerâmico após.
Han et al. 2015	Berço ao túmulo  Cut-off 0,5% de 1m <sup>2</sup>	China (Sul)	n.d.	Fachadas cerâmicas por extrusão	1 m <sup>2</sup> de painéis de fachadas cerâmicas	Uma empresa típica de ladrilho cerâmico no Sul da China	50	CML 2001: ADe; POCP, GWP, AP, EP, ODP; HT	Instalação do painel, devido ao alumínio, exceto a ADe onde foi o aço. No processo de fabrico foi a combustão do gás natural (secagem e cozedura).

Tabela 7 – Revisão bibliográfica de vários estudos de ACV a ladrilhos cerâmicos (fonte: adaptado de Almeida et al., 2016 e Rós-Dosdá et al., 2017) (continuação)

Autores	Fronteira	Cobertura geográfica	Ano de recolha de dados	Tipo ou composição do ladrilho	Unidade funcional	Representatividade	Tempo vida	AICV: categoria de impacto	Ponto crítico ( <i>Hotspot</i> )
Islam et al., 2015a	Berço ao túmulo (exclui a produção de bens capitais)	Austrália	2009	Pavimento interior de uma casa. Não refere o tipo de ladrilho.	Não definida (integrada numa casa por 50 anos)	Integrado numa residência na cidade (3 quartos e garagem). Comparativo de telhas e pavimentos	50	Não especificado: GEE (tCO <sub>2</sub> -eq); CED: NER (GJ); resíduos sólidos (ton); LCC (\$)	Não identificado para ladrilho cerâmico. Trata a comparação entre quatro opções de pavimento. Concluiu que a solução ótima de pavimento inclui cerâmica e madeira
Islam et al., 2015b	Berço ao túmulo (exclui a produção de bens capitais)	Austrália	2009	Pavimento interior de uma casa. Não refere o tipo de ladrilho	Não definida (integrada numa casa por 50 anos)	Integrado numa residência na cidade (3 quartos e garagem). Não apresenta inventário	50	Não especificado: GEE (tCO <sub>2</sub> -eq); CED: NER (GJ); resíduos sólidos (ton); uso da água; LCC (\$)	Não identificado para o ladrilho cerâmico. Referem a etapa de construção e operação da casa como a mais significativa para o GEE e NER. A alteração do tipo de pavimento pode reduzir até 18,6% de GEE e 17,2% NER
Minne and Crittenden, 2015	Berço ao túmulo	EUA	n.d. (anterior a 2010). Inventário não explícito	Pavimento cerâmico com incorporação de vidro reciclado	1 m <sup>2</sup> de pavimento utilizado na casa durante 61 anos. Comparação de 6 tipos de pavimentos	Dados do Sistema BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability), 2010	61	ReCiPe midpoint hierarchist and endpoint: GWP; ADf; POCP; WD; EP; Land occupation; HT	Menores impactes para ladrilho em linóleo e cerâmica, quando comparado com carpete ou madeira. No ladrilho cerâmico a etapa de produção é a mais relevante, seguida da instalação e uso (limpeza)

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela 7 – Revisão bibliográfica de vários estudos de ACV a ladrilhos cerâmicos (fonte: adaptado de Almeida et al., 2016 e Rós-Dosdá et al., 2017) (continuação)

Autores	Fronteira	Cobertura geográfica	Ano de recolha de dados	Tipo ou composição do ladrilho	Unidade funcional	Representatividade	Tempo vida	AICV: categoria de impacto	Ponto crítico (Hotspot)
Almeida et al., 2016	Berço ao túmulo	Portugal	2012	Grés Porcelânico; Pavimento vidrado; Pavimento não vidrado. Monocozedura	1 m <sup>2</sup> de ladrilhos de cerâmica com uma vida útil de 50 anos	4 fábricas Dados originais nacionais a gás natural.	50	CML2001: ADe; ADf; AP; EP; GWP; ODP; POCP ILCD: HT; PM; LU; WD; ET	Etapa de fabrico (cozedura), exceto LU e ET, onde a etapa de uso é a mais relevante. Grés porcelânico apresenta maiores impactes que o vidrado
Aixin Geng, 2017	Berço ao túmulo	China	n.d. (<2008)	Pavimento vidrado.	Cobertura de 1 m <sup>2</sup> de chão. Comparação com madeira.	Dados da China, italianos e espanhóis. Inventário não explícito	50	IPCC 2006: GWP LCC	Não identificado para o ladrilho cerâmico. A substituição do pavimento cerâmico por madeira conduz a diminuição significativa do GWP
Rós-Dosdá et al., 2017	Berço ao túmulo	Espanha	2010–2015	Grés Porcelânico (15 ladrilhos). Monocozedura	Cobertura de 1 m <sup>2</sup> de chão com grés porcelânico por 50 anos	26 empresas produtoras de grés em empresas com cogeração	50	CML2001: ADe; ADf; AP; EP; GWP; ODP; POCP	Etapa de fabrico. Gás natural consumido na fábrica (ADf e GWP) e eletricidade consumida (ODP)

n.d. – não disponível; AA - Absorção de água; ADe – depleção de recursos elementos; ADf – depleção de recursos fósseis; ADP – depleção abiótica de recursos; AP - acidificação; BEES - Building for Environmental and Economic Sustainability; CED – cumulative energy demand; COV – Compostos orgânicos voláteis; ECA – ecotoxicidade aquática; ENR – energia não-renovável; ER- energia renovável; EP – eutrofização; ET – ecotoxicidade; GEE – gases com efeito de estufa; GWP- aquecimento global; HT – toxicidade humana; IPCC - Intergovernmental panel on climate change; LCC - life cycle cost; LU – uso do solo; ODP – depleção da camada de ozono; MP – matérias-primas; POCP – oxidação fotoquímica; PM - partículas; WD – pegada da água.

Conforme se pode verificar da análise da Tabela 7, existem diversos estudos de ACV de ladrilhos cerâmicos nomeadamente nos países maiores produtores deste material como a China (A. Geng et al., 2017; Han et al., 2015), Itália (Belussi et al., 2015; Nicoletti et al., 2002; Pini et al., 2014), Espanha (Benveniste et al., 2011; Bovea et al., 2010; Ibáñez-Forés et al., 2013, 2011; Ros-Dosdá et al., 2018), EUA (Minne and Crittenden, 2015) e Brasil (Ruschi et al., 2014), embora este último estudo seja mais limitado pois utiliza uma base de dados genérica (Ecoinvent 2.2) para inventário (sem especificar detalhes).

Existem ainda outros estudos que integram os ladrilhos cerâmicos numa avaliação integrada em soluções construtivas (Albino and Kühtz, 2004; Bragança and Mateus, 2011) ou mesmo edifícios (Asif, 2007 e Islam et al., 2015 a,b), ou ainda para comparação de materiais (S. Geng et al., 2017; Minne and Crittenden, 2015), não havendo porém um foco dedicado ao estudo do ladrilho cerâmico, nem identificação da tipologia de ladrilho, nem tão pouco detalhes das fases da ACV (ex. dados de inventário, fontes de combustíveis, interpretação).

A revisão bibliográfica realizada mostra que existem diferenças na tipologia de ladrilho analisado e nas tecnologias de fabrico, bem como variações na forma de condução da ACV e seus pressupostos, tal como se descreve a seguir.

#### **a) Tipologia de material e tecnologia de fabrico**

A maioria das ACVs considera o ladrilho de uma forma genérica, sem especificar detalhadamente o tipo de material e consequentes características técnicas distintas (ex. grés porcelânico, pavimento vidrado, monoporosa), exceto dois estudos realizados em Espanha que se referem especificamente a grés porcelânico (Ibáñez-Forés et al., 2011; Ros-Dosdá et al., 2018) e um italiano de um produto inovador de grés porcelânico fino com reforço de fibra de vidro (Pini et al., 2014). Ros-dosdá et al. (2017) realça a importância de 3 variáveis no desempenho do grés porcelânico a saber: espessura, conteúdo de vidrado e existência de tratamento subsequente, referindo que se devem evitar médias, enquanto outro estudo anterior com dados de 35 empresas (Ibáñez-Forés et al., 2011) refere um nível de confiança elevado quando se utilizam dados médios de inventário de fábricas na mesma etapa do ciclo de vida.

Adicionalmente, a função do material nem sempre se apresenta de forma clara na ACV, ou seja, muitos estudos referem a unidade funcional de 1 m<sup>2</sup>, mas não é explícito se é para pavimento de chão ou revestimento de parede, sendo que o material de pavimento pode também ser aplicado como revestimento de parede (em função do tipo de colas e adesivos de colagem utilizados), mas o material de revestimento (grupo BIII) pelas suas características técnicas não pode ser usado como revestimento de chão (pavimento).

Em termos de tecnologia de cozedura, a maioria dos estudos refere-se a tecnologia recente de monocozedura alimentada a gás natural, sendo que o estudo tailandês (Tikul and

Srichandr, 2010) se refere a bicozedura (ou seja o mesmo material é sujeito a duas cozeduras, uma antes da vidragem – cozedura de biscoito e outra após a vidragem), o que por si só acarreta um maior consumo energético e consequentes impactes ambientais.

### **b) Tempo de vida**

Verifica-se que a maioria dos estudos publicados recentemente (2015 a 2017) referem um tempo de vida de 50 anos, enquanto estudos anteriores referem 20 anos. A norma europeia de referência para ladrilhos EN14411:2016 (CEN, 2016) que refere um tempo de vida mínimo de 50 anos. Existem ainda estudos que não apresentam o tempo de vida conforme se pode constatar da análise da Tabela 7.

Esta variável é relevante, pois pode alterar conclusões da ACV, como se depreende do estudo italiano comparativo entre ladrilhos de cerâmica e de mármore (Nicoletti et al., 2002). Neste estudo foi considerado apenas 20 anos para a cerâmica (por questões estéticas), pelo que houve necessidade de substituir uma vez a cerâmica nesse período face ao mármore (40 anos), penalizando assim o desempenho dos ladrilhos cerâmicos cujos impactes ambientais foram cerca do dobro dos obtidos para o mármore.

### **c) Fronteiras do sistema**

Existem estudos do berço ao portão (sete) e estudos com ACV completa ou seja do berço ao túmulo (onze). De mencionar que Bovea et al. (2010) referem a importância do cenário de distribuição do ladrilho cerâmico, nomeadamente a distância percorrida e o tipo de transporte (camião e barco), podendo mesmo os impactes duplicarem e este processo tornar-se o mais significativo.

### **d) Unidade funcional e de referência**

A unidade funcional definida para a maioria dos casos foi de 1 m<sup>2</sup>. No entanto, Rós-Dosdá et al. (2017) alerta para a importância da espessura do material na determinação de impactes ambientais, para além doutros parâmetros, o que pode indiciar a importância da referência mássica.

### **e) Dados de inventário**

Alguns dos estudos de ACV (cerca de 6 dos 18 inventariados na Tabela 7) não apresentam dados de inventário de forma explícita, nem mencionam o uso de dados específicos do material, particularmente nos estudos comparativos de materiais para pavimentos ou nos estudos integrados em edifícios.

Os estudos com dados específicos referem-se a médias anuais, à exceção de dois espanhóis (Bovea et al., 2010; Ros-Dosdá et al., 2018) que são médias plurianuais. Adicionalmente quatro desses estudos não identificam o(s) ano(s) do inventário.

#### **f) Método de AICV e categorias de impacto**

As categorias de impacto como o aquecimento global e a depleção de recursos energéticos são comuns a todos os estudos (tal como no tijolo e na telha), demonstrando a importância do consumo energético e consequentes emissões de gases com efeito de estufa deste subsector, assim como a pertinência destes temas a nível mundial. Como metodologia de cálculo foram usados os fatores de caracterização definidos pelo IPCC para a quantificação do potencial de aquecimento global em quase todos os estudos. No entanto, nem todas as AICV se referem à mesma versão dos fatores de aquecimento global do IPCC, que têm sido atualizados ao longo do tempo. As categorias como a acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozono, oxidação fotoquímica, depleção de recursos abióticos, são também comuns a muitos estudos, embora nem sempre se usem os mesmos métodos de AICV.

O método de AICV mais utilizado é o CML (10 de 18 estudos), embora aplicado com versões diferentes, pois os fatores de caracterização e algumas categorias foram sendo modificados ao longo do tempo. Existem 3 estudos que não referem de modo explícito o método de AICV utilizado. A maioria dos estudos aplica apenas um método de AICV. Foram usados ainda outros métodos de AICV disponíveis na comunidade científica, como o ReCiPe (Minne and Crittenden, 2015), Impact 2000+ (Pini et al., 2014) e o Eco-indicator (Tikul, 2014), mas em apenas num único estudo, o que limita a comparação de resultados por serem utilizadas categorias e unidades distintas.

O método de AICV pode influenciar a interpretação e as conclusões da ACV, citando-se que Tikul e Srichandr. (2010) determinaram a depleção de recursos fósseis (“energia”) como a mais relevante, seguida dos inorgânicos respiratórios e alterações climáticas utilizando o método Eco-indicator 99, enquanto que com o método EDIP foram as alterações climáticas e a toxicidade humana as mais relevantes.

#### **g) Ponto crítico (“hotspot”)**

A etapa do berço-ao-portão é a mais significativa para grande parte das categorias de impacto (ADf, GWP, AP, POCP, etc.) analisadas nos diversos estudos de ACV da Tabela 7 devido principalmente ao consumo intensivo de energia na fábrica (nos processos de cozedura, atomização e secagem). No entanto, segundo Nicoletti et al. (2002), para a toxicidade humana a fusão da frita é a que apresenta o maior contributo com 37%, atendendo à composição química e processos térmicos associados ao fabrico da frita seguindo-se a cozedura com 30% (emissões de arsénio como mais significativas).

O transporte das matérias-primas foi apontado como um processo crítico no estudo tailandês (Tikul and Srichandr, 2010), justificado por uma distância de transporte das matérias-primas superior à dos restantes estudos (já que esse país não possui toda a tipologia de matérias-primas necessárias à formulação da composição cerâmica).

Alguns produtos cerâmicos avançados foram também avaliados em termos de ACV (Belussi et al., 2015; Pini et al., 2014). Neste caso as conclusões foram um pouco distintas uma vez que para o fabrico de grés porcelânico fino de grandes dimensões reforçado com fibra de vidro (também conhecido como lamina cerâmica) os processos unitários com maior impacto são o fabrico da pasta/barbotina cerâmica (28%) (que apresenta componentes especiais para reforçar as suas propriedades) e o processo de colagem da fibra de vidro (21%), afetando categorias como as partículas respiratórias inorgânicas, o aquecimento global e a energia não renovável (Pini et al., 2014). No caso dos ladrilhos cerâmicos com deposição de filmes fotovoltaicos finos, esta funcionalização da deposição destas camadas tem um impacto superior ao da produção do ladrilho cerâmico, assumindo-se assim como hotspot (Belussi et al., 2015).

No caso das fachadas cerâmicas por extrusão, as conclusões são distintas com a etapa de instalação da fachada como a mais relevante para a maioria das categorias de impacto (contributo superior a 40%), justificada pela utilização de alumínio, exceto a depleção abiótica de elementos onde foi o aço o material dominante (superior a 50%) (Han et al., 2015).

### **h) Variáveis que podem afetar os resultados**

Pini et al. (2014) efetuaram um estudo de sensibilidade no cenário de distribuição dos ladrilhos tendo concluído que a passagem de um raio de 100 km para 3084 km agrava as categorias de impacto tais como a toxicidade cancerígena (aumento de 44%), a acidificação e eutrofização (+38,6%), depleção da camada de ozono (+31,9%) e as partículas respiratórias (+27,6%).

Ibáñez-Forés et al. (2013) testaram ainda algumas das melhores técnicas disponíveis (MTDs) incluídas no documento de referência da indústria cerâmica (BREF) (European Commission, 2007) para os ladrilhos espanhóis tendo concluído que as mais sustentáveis (do ponto de vista ambiental e económico) para a indústria cerâmica são a recuperação de gases de combustão e sistemas de tratamento de gases (com carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio), podendo alcançar reduções de mais de 95%.

## **4 Estudos de caso: ACV em produtos de cerâmica para construção**

Neste capítulo desenvolvem-se diversos estudos de caso de desempenho ambiental de materiais cerâmicos utilizados na construção, nomeadamente o tijolo, a telha, o pavimento e o revestimento, com recurso à metodologia de ACV descrita no capítulo 3.1. As dificuldades experimentadas, considerações e limitações identificadas nas diversas atividades no decurso deste trabalho são também expostas.

Estes estudos de caso foram realizados com base em dados reais de produtos fabricados na indústria nacional de cerâmica ao longo do tempo (cerca de 30 casos reais de empresas). Neste contexto, durante o desenvolvimento da investigação utilizaram-se diferentes ferramentas e abordagens metodológicas como sejam a revisão bibliográfica, análise de normas existentes e em desenvolvimento sobre o tema, participação em comissões técnicas, participação em congressos nacionais e internacionais, entrevista e consulta de peritos especialistas e desenvolvimento de casos de estudo múltiplos de produtos cerâmicos produzidos em Portugal aplicando a ACV, contribuindo assim para a modelação de ciclo de vida (CV). A abordagem seguida foi do berço ao portão e do berço ao túmulo. De mencionar que, a recolha de dados nas empresas cerâmicas se efetuou com o intuito de recolher dados mais representativas em termos de tecnologias de fabrico utilizadas e estudar as variáveis críticas potencialmente impactantes e envolveu trabalho experimental de entrevista, recolha, tratamento e análise de dados dos produtos fabricados. Para além das variáveis tecnológicas (associadas ao processo de fabrico) foram ainda testadas variáveis temporais e variáveis metodológicas (em termos de condicionantes da própria ACV).

O propósito de cada um destes estudos de caso será detalhado em cada subcapítulo, mencionando-se genericamente que, para além de se determinar e posicionar o impacto ambiental dos produtos nacionais face ao desempenho de outros estudos de ACV existentes, se pretende identificar pontos críticos (hotspots), estudar a influência de algumas variáveis do processo de fabrico, bem como desenvolver medidas de melhoria para esse desempenho e respetiva eficácia. Conforme referido, alguns dos progressos destes estudos de caso foram entretanto publicados (ver anexo A1).

### **4.1 Tijolos cerâmicos**

Este estudo de caso desenvolve-se com o propósito de realizar uma ACV a materiais cerâmicos utilizados na construção, tendo a seleção do produto recaído sobre o tijolo de furação horizontal, o mais utilizado em Portugal.



#### **4.1.1 Descrição do produto**

O produto é o tijolo cerâmico para alvenaria, isto é, a unidade cerâmica de alvenaria, produzida com argila ou outros materiais argilosos, com ou sem inertes, combustíveis ou outros aditivos, cozida a temperatura suficientemente elevada a fim de ser obtida uma ligação cerâmica (baseado na definição 3.2 da norma NP EN 771-parte 1+A1:2016 (IPQ, 2016). Trata-se de um tijolo de baixa massa volúmica seca aparente (inferior a 1000 kg/m<sup>3</sup>), unidade LD (“low density”), para utilização em alvenaria protegida. Adicionalmente, é um tijolo de furação horizontal, ou seja, com vazio formado que atravessa completamente um tijolo cerâmico de alvenaria paralelamente ao seu leito conforme NP EN 771+A1:2016 (IPQ, 2016).

#### **4.1.2 Metodologia**

A metodologia de ACV seguida neste estudo de caso englobou as quatro fases: a definição do objetivo e âmbito; o inventário do ciclo de vida (ICV); a avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) e a interpretação, de acordo com a ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 (ISO, 2006a, 2006b). A abordagem seguida foi do “berço ao túmulo”, apesar de se apresentarem abordagens do “berço ao portão”, com etapas modulares conforme definido na norma EN 15804 + A1:2013 (CEN, 2013) sobre RCP de materiais de construção.

##### **4.1.2.1 Definição de objetivo e âmbito**

O objetivo desta ACV é identificar e avaliar o impacto ambiental associado à extração, produção, distribuição, uso e fim de vida de 1 m<sup>2</sup> de parede simples de alvenaria com tijolo de furação horizontal produzida em Portugal, com vista a:

- fundamentar as opções a serem consideradas no desenvolvimento de RCP (tipo de alocação, cut-off, tipologia de dados de inventário, indicadores de categoria de impacto);
- comparar o desempenho ambiental quando são utilizados diferentes combustíveis no processo da cozedura na etapa de produção;
- aferir a evolução em termos de categorias de impacto em 8 anos (dados de 2008 vs 2016) para o fabrico de tijolo;
- quantificar outras categorias de impacto ambiental, para além das mencionadas na norma EN 15804+A1 (CEN, 2013) aplicável a produtos de construção, atendendo ao conjunto limitado de categorias prevista naquela norma;
- comparar os resultados obtidos usando diferentes métodos de AICV e determinar até que ponto os resultados são influenciados pelo método aplicado (CML-IA e ILCD) para a acidificação e oxidação fotoquímica;

- perceber a influência dos impactos ambientais das infraestruturas (construção de edifícios fabris, maquinaria, equipamentos, etc.) nos resultados dos impactos ambientais da abordagem do berço ao portão;
- relacionar os resultados por unidade funcional ( $\text{m}^2$ ) e por unidade declarada (kg) verificando a influência da dimensão largura do tijolo nos resultados (comprimento e a altura são os mesmos).

#### 4.1.2.2 Unidade funcional e unidade declarada

A unidade funcional é definida como 1  $\text{m}^2$  de parede simples de alvenaria com tijolo tradicional de furação horizontal, com juntas de argamassa de assentamento de 1 cm, sem qualquer revestimento, para um período de 50 anos.

Esta unidade funcional equivale a 71,6 kg de tijolo de parede efetuada com tijolo de 30x20x11 cm denominado por “tijolo de 11”. Selecionou-se o “tijolo de 11” que é o mais produzido em Portugal e é também o mais usado quer em paredes interiores quer em exteriores. A construção da parede interior de tijolo cumpre com a função de dar suporte à estrutura da construção, bem como separar divisões interiores (função envelope) ajudando no isolamento térmico e acústico.

As características técnicas médias desta tipologia de “tijolo de 11” constam na Tabela 8:

*Tabela 8 – Características técnicas do tijolo de 11*

Característica	Unidade	Valor
Dimensões	mm	300 x 198 x 108
Resistência à compressão	N/mm <sup>2</sup>	1,5 (categoria II)
Reação ao fogo	Euroclasse A1	Euroclasse A1 (incombustível)
Absorção de água		Não destinado a ser exposto
Massa volúmica bruta	kg/m <sup>3</sup>	650
Resistência térmica	m <sup>2</sup> K/W	0,3

Adicionalmente foi também definida uma unidade declarada de 1 kg de parede de alvenaria de tijolo, com juntas de argamassa de assentamento de 1 cm, sem qualquer revestimento, para um período de 50 anos. Esta unidade adicional permitirá uma comparação com alguns estudos anteriores já mencionados no capítulo 3.2.1.

#### 4.1.2.3 Fronteiras do sistema

A fronteira do sistema inclui todas as etapas do ciclo de vida da parede de tijolo cerâmico, ou seja as etapas da extração e processamento de matérias-primas, aquisição de materiais processados e seu transporte, a produção de tijolo, a distribuição e instalação do tijolo na parede (incluindo a argamassa), o uso (utilização, manutenção, reparação, substituição e

reabilitação) e o fim de vida (desconstrução e demolição, transporte, processamento dos resíduos e eliminação final), de acordo com o modelo de etapas estabelecido na EN 15804+A1 (CEN, 2013).

Foram excluídas das fronteiras do sistema, a produção e manutenção de bens de capital, tais como edifícios, maquinaria, equipamentos, etc.. Porém, e como análise de sensibilidade na etapa do berço ao portão (A1 a A3), efetua-se a estimativa do impacte destas infraestruturas, considerando os dados de inventário contidos na base de dados ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).

A Figura 11 representa de forma sumária todas as etapas de ciclo de vida da parede de alvenaria em tijolo, seguindo uma abordagem do “berço ao túmulo” (“cradle-to-grave”).

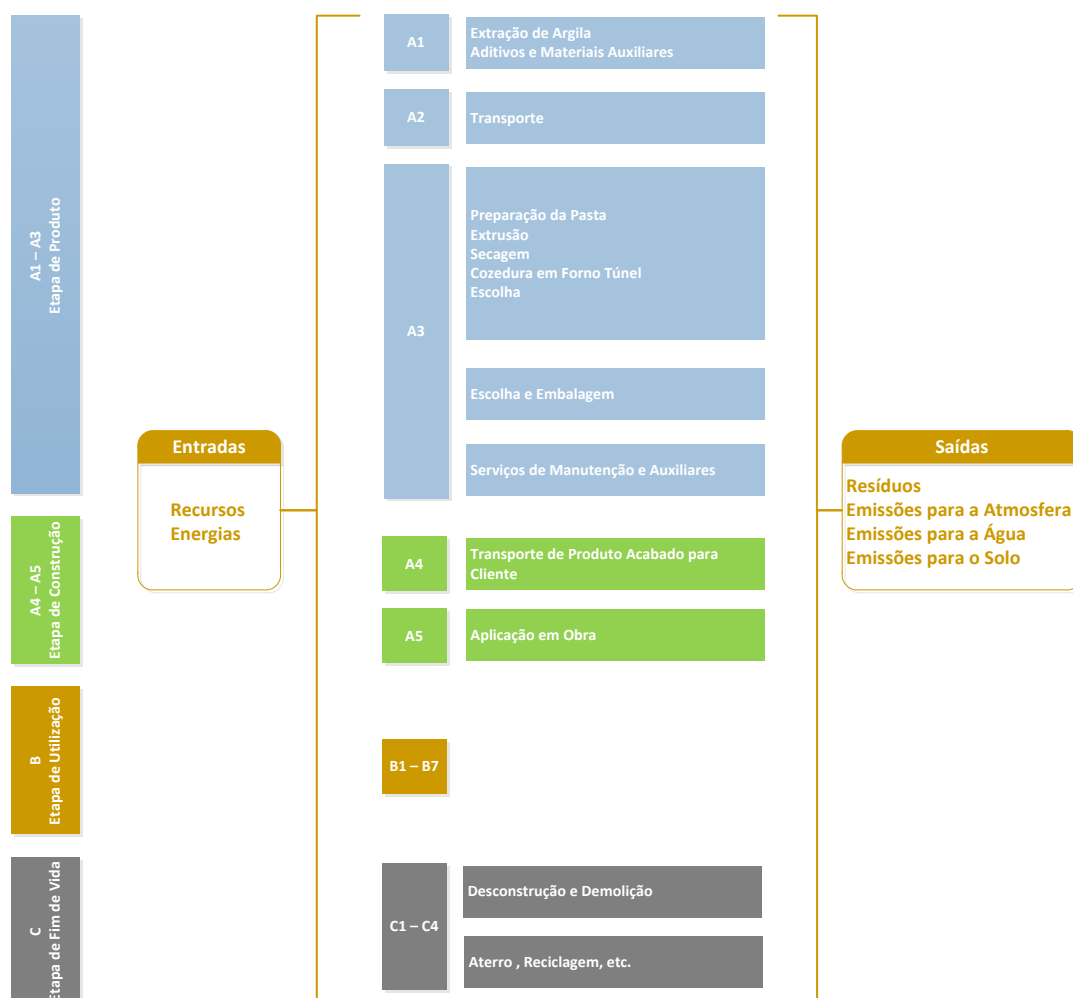


Figura 11 – Fronteiras do sistema da parede de tijolo cerâmico

De seguida é efetuada uma descrição de cada uma das etapas do ciclo de vida do tijolo cerâmico.

a) Etapa de produto (módulos A1-A3)

O módulo A1 engloba a extração e processamento de recursos naturais como argilas (matérias primas de base) e areias (menor quantidade e em regra inferior a 10%) em pedreiras, e a aquisição (após processamento) de materiais auxiliares como materiais de manutenção (óleo, oxigénio, acetileno, etc.) e refratários. Quer as argilas quer as areias são escavadas mecanicamente de acordo com um plano de pedreira, constituído pelo plano de lavra e pelo plano ambiental e de recuperação paisagística, e posteriormente são transportadas para armazéns intermédios ao ar livre (moreias) que podem ou não ser contíguos às unidades industriais. No fabrico de tijolos, os barreiros estão normalmente próximos (raio inferior a 10 - 40 km) da fábrica.

A este módulo de extração estão normalmente associados aspetos e impactes ambientais como o consumo de recursos, consumo de energia (maquinaria e transporte), produção de resíduos (normalmente os resíduos da exploração de argilas são integrados no próprio processo de recuperação paisagística, existindo porém outros associados ao funcionamento da maquinaria como óleos usados, pneus, baterias, sucata, etc.). No caso da extração da areia, para além dos aspetos ambientais acima descritos, poderão surgir alguns associados à crivagem e lavagem da areia.

Quando adquiridas a fornecedores especializados, as matérias-primas argilosas são rececionadas a granel, sendo armazenadas alternativamente ao ar livre, em bruto, ou em tulhas cobertas, se previamente processadas. Nos estudos de caso em análise, as matérias-primas são obtidas quer em barreiros pertença da empresa, quer adquiridas a terceiros.

O módulo de produção do tijolo cerâmico (A3) inclui os seguintes processos unitários:

- armazenagem de matérias-primas;
- preparação da pasta;
- moldagem por extrusão;
- secagem;
- cozedura;
- escolha, embalagem e armazenamento.

Na Figura 12 apresenta-se o fluxograma de fabrico do tijolo cerâmico na fábrica evidenciando-se os principais aspetos ambientais.

Durante a armazenagem de matérias-primas ocorre a estratificação que, tem como objetivo a homogeneização de diferentes tipos de argilas e areias (compensando eventuais oscilações das características das matérias primas no barreiro). Este armazenamento ocorre ao ar livre (sujeito à ação dos fatores climáticos) de forma a proporcionar o

envelhecimento e a criação de um stock que garanta o abastecimento durante os períodos de inacessibilidade dos barreiros (nomeadamente no período chuvoso).

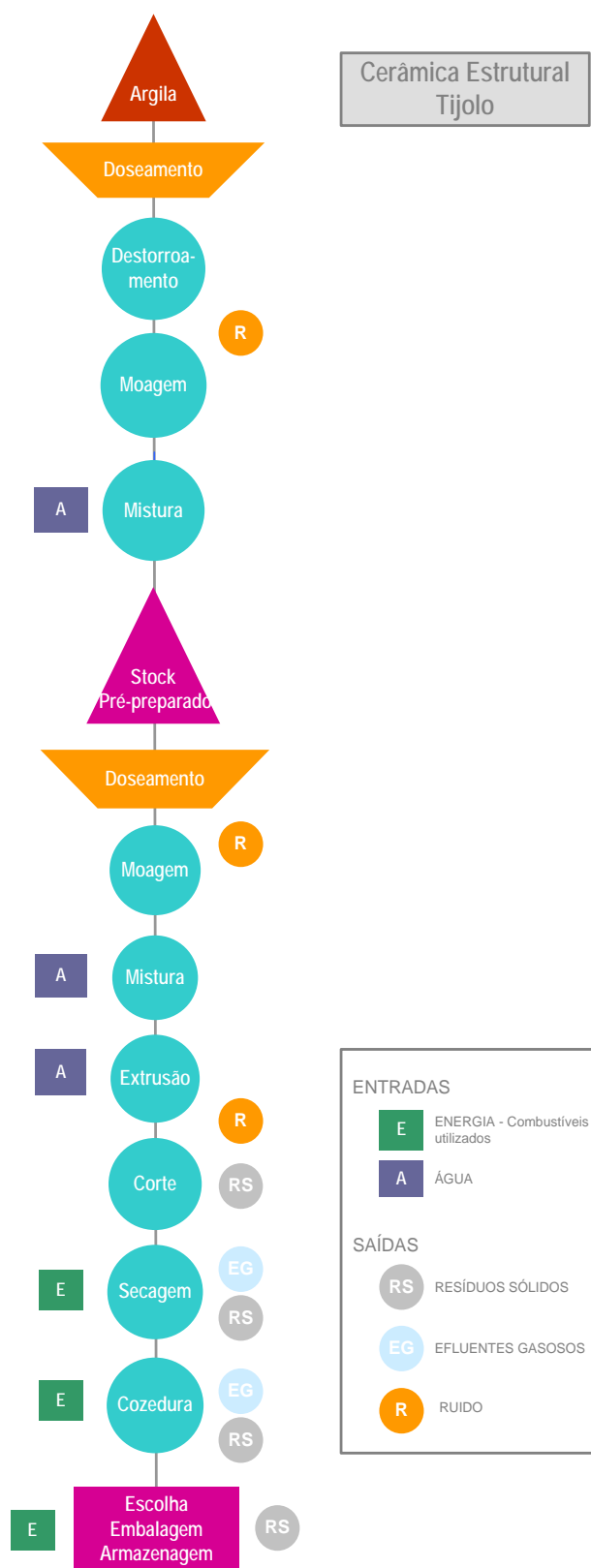


Figura 12 – Fluxograma de fabrico do tijolo cerâmico com identificação de principais aspetos ambientais

A operação de preparação da pasta tem como objetivo assegurar as características tecnológicas adequadas à conformação dos produtos (mistura, granulometria e humidade). Assim a matéria-prima sofre novamente uma mistura, moagem e laminação e efetuado um primeiro ajuste do conteúdo de água em função do teor de humidade das argilas. Nesta fase são eliminados os contaminantes metálicos e as pedras. Existem ainda sistemas de despoeiramento (dotados de filtro de mangas), onde as poeiras recolhidas são descarregadas diretamente para a tela de transporte que conduz ao misturador, sendo desta forma reintroduzidas no circuito de produção. Estes sistemas de despoeiramento podem possuir ou não uma chaminé para o exterior.

A moldagem ou conformação dos tijolos de cerâmica é por via plástica, e tem por objetivo dar a forma final aos produtos (vários formatos de tijolo).

Nesta fase a argila pré-preparada é introduzida numa extrusora ou fieira (extrusão sob vácuo) seguida de corte, podendo ser adicionada água caso necessário. Nalguns casos adiciona-se vapor para facilitar a extrusão. Os desperdícios resultantes do corte são reconduzidos aos doseadores do sector de preparação de pasta para voltarem ao processo. Depois de cortados, os tijolos verdes são agrupados e carregados por bandejas nas vagonas pela máquina carga.

A operação de secagem dos produtos de cerâmica estrutural é tipicamente efetuada em secadores contínuos ou semi-contínuos (tipo túnel de carga direta, de vagonetas ou rápido tipo anjou) ou intermitentes (câmaras estáticas, como no estudo de caso do fabrico com coque). O material é sujeito a um processamento térmico a temperaturas até 120 °C o que permite reduzir a humidade do material (até 1 a 3%) durante um período de cerca de 72 horas. Como fontes de calor para esta operação, é utilizada tipicamente a recuperação do forno (ar ambiente de arrefecimento dos produtos) que pode ser complementada com queimadores auxiliares (gás natural, gás propano ou caldeira) se for necessário (tipicamente apenas nos dias mais frios do ano). Os cacos secos gerados nesta fase do processo são encaminhados para a zona de armazenamento de matéria-prima, de modo a serem reincorporados no processo produtivo.

Após secagem, os produtos são submetidos a uma operação de processamento térmico a temperaturas entre 850 e 1050 °C durante 17 a 25 horas designada por cozedura sendo efetuada em fornos contínuos tipo túnel numa atmosfera oxidante. Algumas unidades industriais estão equipadas com um pré-forno, que permite efetuar uma secagem final adicional (remoção da água residual).

Após a zona de cozedura (“zona de fogo”) e antes de saírem do forno os tijolos são arrefecidos por uma contracorrente de ar ambiente (frio), que é introduzida no secador recuperando assim o calor produzido na operação de arrefecimento.

Os combustíveis mais utilizados no forno são os combustíveis sólidos (coque de petróleo e biomassa - casca, pó de cortiça, serrim, entre outros) e de forma residual o gás natural (atualmente menos utilizado face ao elevado preço deste combustível), apesar deste último ser a melhor técnica disponível (MTD) de acordo com o documento de referência para a indústria cerâmica (European Commission, 2007) para este subsector.

O material é descarregado do forno e transferido para a linha de escolha e embalagem, que tipicamente inclui as operações de paletização, cintagem e/ou embalagem (plástico). Após embalagem, os produtos são transportadas com recurso a meios auxiliares de movimentação (empilhadores) para o parque de produto final, onde são temporariamente armazenados para posterior expedição.

O módulo de fabricação (A3) inclui ainda as operações de manutenção desenvolvidas na fábrica, bem como sistemas de tratamento de águas residuais e sistemas de tratamento de efluentes gasosos nos diversos locais (sistemas de despoeiramentos por via seca em todos os estudos de caso). De mencionar que nenhuma das instalações fabris consideradas nos estudos de caso dispõe de sistema de tratamento de efluentes gasosos dos fornos.

### b) Etapa de construção (módulos A4-A5)

O módulo A4 inclui o transporte do tijolo cerâmico para os centros de distribuição e o respetivo transporte para o local de construção (obra). Neste caso, foi aplicado um cenário de transporte por estrada em camião de 25 toneladas para a distância total de 200 km, considerando uma distância média representativa para Portugal (face à localização das principais unidades fabris).

Já o módulo A5 relativo à construção inclui a produção da argamassa, as perdas de tijolo no local de construção (assumiu-se um valor de 3% para todos os estudos de caso), bem como o consumo de energia, água e as emissões associadas à construção da parede de tijolo.

Foi assumido que os tijolos são colocados manualmente com juntas de argamassa de assentamento de cimento de 1 cm. As composições típicas de argamassa para a colocação de tijolos incluem o cimento, areia e água. Para 1 m<sup>2</sup> de parede de tijolo (formato 30x20x11) com juntas de 1 cm, assumiram-se valores típicos de 29 kg de argamassa e 14% de água.

### c) Etapa de uso (módulos B1-B7)

O tijolo não exige nenhum material ou consumo de energia após a sua instalação e não liberta emissões para o meio ambiente. Portanto, a etapa de uso (módulos B1 a B7) não tem contributos em termos de massa, energia ou outros aspetos ambientais (entradas ou saídas).

d) Etapa de fim de vida (módulos C1-C4)

Esta etapa inclui a desconstrução da parede de tijolo e o destino final deste material de demolição. Atualmente, o processo final de eliminação de tijolos cerâmicos em Portugal consiste na sua utilização como material de enchimento em infraestruturas (por exemplo, as fundações de edifícios) após a sua trituração ou ainda a deposição em aterro.

Neste estudo optou-se por um cenário mais conservador de deposição em aterro, pelo que nesta etapa são incluídos os consumos de materiais e energia, as emissões de aterro, o transporte dos resíduos de tijolos (cacos) por camião de 25 toneladas para o aterro, tendo-se assumido uma distância média de 50 km.

#### **4.1.2.4 Inventário de ciclo de vida**

Os dados associados à extração (A1), transporte para a unidade de produção (A2) e à produção de tijolo (A3), referem-se a dados produtivos (ex. consumos de materiais e energia, dados de produção realizada) e dados de desempenho ambiental (ex.: medições de efluentes, consumos energéticos, geração de resíduos), representativos do ano de 2016.

Foram estudados 4 cenários com base em dados reais representativos dos combustíveis utilizados nos fornos em Portugal, nomeadamente o de gás natural, biomassa e coque de petróleo e uma queima mista (biomassa e coque). De mencionar que, apesar do gás natural ser a MTD do sector, conduzindo em regra a menores emissões, os custos de investimento e de operação em fábrica são muito superiores aos dos combustíveis sólidos (biomassa e coque de petróleo) e como as empresas estão abrangidas pelo Comércio Europeu de Licenças de Emissão (logo a biomassa neste âmbito é considerada como neutra em emissões), a maioria das unidades industriais fez uma reconversão total ou parcial para os combustíveis sólidos, preferencialmente com biomassa.

Os dados específicos foram recolhidos junto dos fabricantes (faturas, relatórios, boletins de caracterização de efluentes gasosos, registos no âmbito do PRTR - Pollutant Release and Transfer Register, mapa integrado de registo de resíduos (MIRR), etc.). Recorreu-se aos dados da base de dados “ecoinvent 3” (Ecoinvent, 2014) para os restantes processos unitários gerais (genéricos), com algumas adaptações, tendo sido seguido o modelo atribucional. No caso da eletricidade e do gás natural foi adequado o processo da base de dados “Ecoinvent” ao mix real verificado no ano do inventário em Portugal, de acordo com diversas fontes nacionais e europeias tais como a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG) (DGEG, 2017) e a Agência Internacional de Energia (IEA) (IEA, 2016).

As fontes de informação utilizadas na recolha de dados de inventário (ICV) estão sumariadas na Tabela 9. A validação de dados dos fabricantes incluiu balanços de massa, a comparação com dados dos fabricantes de anos anteriores e com fatores de emissão disponibilizados no documento de referência BREF CER (European Commission, 2007).



*Tabela 9 – Fontes de dados utilizados para a fase de recolha de inventário do tijolo*

<b>Etapas</b>	<b>Módulo</b>	<b>Descrição de dados</b>	<b>Fonte de dados</b>
Extração de matérias primas	A1	Entradas e saídas	Indústria extrativa portuguesa. Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).
Processamento de materiais auxiliares	A1	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).
Transporte de materiais para a fábrica de tijolo	A2	Distância, modo de transporte, tipo de combustível	Indústria extrativa portuguesa e fábricas de produção de tijolos nacionais para quantificar a carga, energia requerida, modo de transporte e tipo de combustível. Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014) para os fatores de emissão.
Fábrica de tijolo	A3	Entradas e saídas	Fábricas de tijolo, representativas da tipologia de produção e das tecnologias nacionais. Consulta de faturas, contadores, registos, boletins de análise de parâmetros ambientais, PRTR, MIRR.
Transporte para o local de construção	A4	Distância, modo de transporte, tipo de combustível	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).
Produção de fixativo (argamassa de cimento)	A5	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).
Construção da parede de tijolo na obra de construção com a argamassa	A5	Entradas e saídas	Fichas técnicas da Secil Argamassas (SECIL, 2017, 2012).
Produção da eletricidade em 2016 (Portuguese mix)	A1, A3, A5	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014) adaptada para o mix de 2016 segundo dados oficiais (IEA, 2016).
Produção de combustível	A1 a A4, C1-C4.	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014), adaptada ao mix nacional no caso do gás natural (DGEG, 2017).
Etapas de uso	B1-B5	Não significativo (sem entradas nem saídas)	
Fim de vida (desconstrução)	C1	Entradas e saídas, incluindo o gásóleo consumido	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014)

Os dados de inventário de entrada e de saída para a etapa de produto (A1-A3) expressos por 1 m<sup>2</sup> de parede de tijolo cerâmico (equivalente a 71,6 kg de tijolo) constam da Tabela 10 e da Tabela 11 respetivamente. Em cada coluna constam as opções de combustível

utilizadas no forno de cozedura de fabrico do tijolo. No caso da biomassa, esta é composta maioritariamente por resíduos florestais, serrim e casca de madeira. Adicionalmente, e quando disponível é utilizado o pó de cortiça, casca de arroz, bagaço de azeitona, o que não foi o caso no ano de 2016.

As saídas incluem materiais/produtos, emissões atmosféricas, resíduos e emissões líquidas (neste caso apenas o efluente doméstico já que não ocorrem efluentes líquidos de cariz industrial no processo de fabrico de tijolos).

Tabela 10 – Dados de inventário para a etapa de produto (A1 a A3) de 1 m<sup>2</sup> de tijolo (entradas)

Entradas	Unidade	Biomassa	Coque	50% coque + 50% biomassa	Gás natural
Argila	kg	8,52E+01	8,59E+01	8,68E+01	8,74E+01
Areia	kg	7,50E-01	--	--	--
Água de furo	l	5,23E+00	1,18E+01	1,30E+01	6,80E+00
Água rede pública	l	1,95E-01	2,04E-01	2,36E-01	2,09E-01
Elettricidade	kWh	3,42E+00	2,94E+00	3,04E+00	2,63E+00
Gás natural	Nm <sup>3</sup>	--	--	--	2,13E+00
Coque de petróleo	kg	--	3,09E+00	1,59E+00	--
Biomassa	kg	7,87E+00	--	3,87E+00	--
Gasóleo	MJ	3,51E+00	3,15E+00	3,63E+00	2,92E+00
<i>Material de manutenção:</i>					
Óleo de lubrificação	l	8,45E-04	9,45E-04	8,74E-04	4,18E-04
Acetileno	kg	5,43E-05	2,31E-04	1,85E-04	5,18E-05
Oxigénio	kg	5,66E-05	3,08E-04	2,40E-04	3,24E-05
<i>Material de embalagem:</i>					
Palete de madeira	Número	9,09E-03	1,33E-02	1,15E-02	1,30E-02
Filme plástico	kg	2,13E-02	5,69E-03	3,94E-03	7,12E-03
Cinta	kg	6,14E-05	2,48E-03	2,48E-03	2,55E-03
Metálica	kg	1,00E-05	1,12E-05	1,04E-05	1,07E-05
Transporte de matérias-primas: camião 25 ton	tkm	2,13E+00	2,58E+00	2,17E+00	2,18E+00

--não aplicável

*Tabela 11 – Dados de inventário para a etapa de produto (A1 a A3) de 1 m<sup>2</sup> de tijolo (saídas)*

Saídas	Unidades	Biomassa	Coque	50% coque + 50% biomassa	Gás natural
<i>Emissões para o ar:</i>					
PM<10	kg	3,65E-03	1,22E-03	1,69E-03	1,06E-03
PM>10	kg	8,52E-03	1,17E-03	1,76E-03	2,07E-04
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	kg	9,28E-01	1,02E+01	6,52E+00	5,03E+00
Ácido fluorídrico (HF)	kg	1,22E-03	1,60E-03	1,36E-03	5,49E-04
Ácido clorídrico (HCl)	kg	2,15E-03	1,82E-03	2,13E-03	5,36E-04
Monóxido de carbono (CO)	kg	6,27E-02	3,51E-02	3,79E-02	4,08E-02
Óxidos de azoto (NO <sub>x</sub> )	kg	9,81E-03	1,13E-02	1,03E-02	3,12E-03
COVNM	kg	1,41E-03	1,48E-03	2,21E-03	1,41E-03
Óxidos de enxofre (SO <sub>x</sub> )	kg	1,21E-03	1,29E-01	9,61E-02	2,86E-03
Arsénio (As)	kg	4,94E-08	3,08E-08	6,25E-08	5,33E-08
Cádmio (Cd)	kg	6,87E-07	1,17E-06	7,05E-07	5,16E-07
Crómio (Cr)	kg	1,58E-06	9,37E-06	8,87E-06	1,72E-06
Cobre (Cu)	kg	1,74E-06	3,42E-06	1,64E-06	4,58E-08
Mercúrio (Hg)	kg	1,79E-07	3,39E-07	2,81E-07	2,58E-07
Níquel (Ni)	kg	6,48E-06	5,89E-05	3,22E-05	2,48E-06
Chumbo (Pb)	kg	1,20E-05	1,58E-05	1,25E-05	5,16E-06
Zinco (Zn)	kg	n.d.	1,80E-06	2,98E-06	n.d.
<i>Resíduos</i>					
Resíduos totais produzidos	kg	1,22E-01	4,40E-01	1,12E-01	6,40E-02
Resíduos valorizados	kg	1,21E-01	4,39E-01	1,11E-01	6,06E-02
Resíduos não valorizados	kg	4,31E-04	8,52E-04	1,79E-03	3,43E-03
Resíduos perigosos	kg	3,76E-03	1,35E-02	3,82E-03	2,93E-03

n.d. – não disponível (dado não medido ou não disponibilizado pela empresa); PM<10 - partículas com diâmetro inferior a 10 µm; PM>10 - partículas com diâmetro superior a 10 µm

Os consumos de matérias-primas são muito semelhantes nos diversos estudos de caso, tal como seria de esperar, uma vez que não dependem da tipologia de combustível, sendo de mencionar que, apenas um consome diretamente areia (o que opera em exclusivo a biomassa). Também o consumo de materiais de manutenção é semelhante, verificando-se uma tendência para maiores consumos nos casos que operam a coque, o que deverá estar associado a um maior número de equipamentos e operações de manutenção que a operação com este combustível exige.

No que respeita a consumos energéticos verifica-se que os equivalentes energéticos por massa são semelhantes, com o menor valor a ser atingido para o gás natural.

No que respeita a emissões, verifica-se que as menores emissões de CO<sub>2</sub> se atingem para a biomassa e as maiores para o coque de petróleo como seria de esperar face à sua composição e ao cariz neutro da biomassa (absorve CO<sub>2</sub> no processo de crescimento das árvores e liberta-o aquando da queima). Já no que respeita a partículas, a biomassa é o maior emissor (devido ao maior teor de cinzas deste combustível) e o gás natural o menor. No que respeita a SO<sub>2</sub> e metais pesados, o coque assume-se como o maior emissor, tal como seria de esperar, face à sua composição. As emissões de compostos orgânicos voláteis – não metano (COVNM) são semelhantes nos 4 cenários, apesar da queima mista de biomassa e coque assumir uma emissão superior explicada pelo tipo de composição dos combustíveis e condições da queima. Também a emissão de NO<sub>x</sub> é semelhante (uma vez que a sua formação é principalmente térmica e função da temperatura máxima, que é semelhante nos diversos casos em estudo).

Quanto a fluoretos e cloretos que são elementos característicos da própria argila cerâmica, mas cuja libertação pode ser condicionada pela curva de temperatura de cozedura (Almeida et al., 2001), verificou-se que os valores mais baixos foram libertados aquando da cozedura a gás natural.

Finalmente, em termos de resíduos, verifica-se que a grande maioria é valorizada (93,3% a 99,8%) de acordo com os dados do Mapa Integrado de Registo de Resíduos (MIRR) referindo-se que no que respeita ao caco (resíduo maioritário), grande parte é utilizada na regularização de caminhos do estabelecimento industrial, nivelação de cotas de parques ou mesmo no acesso aos barreiros próprios configurando uma operação de gestão de resíduos de valorização não energética (n.º 4 do artigo 23 do Decreto-Lei n.º 178/2006, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011).

#### **4.1.2.5 Avaliação de impactes ambientais**

De forma a avaliar os impactes ambientais do tijolo foram escolhidas as categorias e métodos que se seguem:

- aquecimento global, depleção da camada de ozono, depleção de recursos abióticos (elementos), depleção de recursos abióticos (fósseis), eutrofização, acidificação, formação de ozono fotoquímico (oxidação fotoquímica), usando a versão de Outubro de 2012 do conjunto de fatores de caracterização do CML-IA (Leiden University), conforme preconizado na norma EN 15804+A1 (CEN, 2013);
- matéria particulada, uso do solo, toxicidade humana e ecotoxicidade para a água doce, esgotamento dos recursos – água (depleção da água), usando os fatores de caracterização contemplados nos métodos recomendados pelo ILCD (EC-JRC, 2012), de acordo com a Recomendação n.º 2013/179/EU da UE que aborda a pegada

ambiental e métodos, e ainda no relatório técnico Draft TR WI 00350023 (2016) em elaboração pelo comité técnico do CEN TC 350 (exceto radiação ionizante por não ser considerada relevante para esta tipologia de materiais, nem existirem dados suficientes que permitam uma avaliação robusta desta categoria de impacto);

- acidificação e oxidação fotoquímica pelos métodos recomendados pelo ILCD (EC-JRC, 2012), de forma a poder averiguar se o comportamento é semelhante ou não com o determinado pelo conjunto de métodos CML-IA preconizado na EN15804+A1:2013.

Esta escolha das categorias de impacto teve por base critérios de relevância dos temas ambientais para os materiais cerâmicos de cerâmica, nomeadamente:

- dados de inventário disponíveis;
- categorias de impacto identificadas em estudos anteriores de ACV em materiais cerâmicos (Almeida et al., 2011b, 2015b; Center for Clean Products, 2009; Souza et al., 2016);
- categorias de impacto definidas na norma EN15804+A1 (CEN, 2013) sobre regras de base para as categorias de produtos de construção, no qual os materiais cerâmicos de construção estão incluídos;
- categorias de impacto ambientais previsíveis face a novos instrumentos entretanto publicados como a PAP (Comissão Europeia, 2013a);
- coerência com as categorias de outros materiais cerâmicos (ex. telha, pavimento e revestimento);
- robustez dos métodos e sua aceitação por partes interessadas.

De mencionar que a incerteza associada aos fatores de caracterização da toxicidade humana e da ecotoxicidade é superior a outros fatores, de acordo com o relatório técnico ISO/TR 14047 (ISO, 2012a). No entanto, sendo estas potenciais categorias de impacto para esta tipologia de materiais cerâmicos, bem como categorias incluídas na PAP isto é na Recomendação n.º 2013/179/EU (Comissão Europeia, 2013a) entendeu-se oportuno analisá-las.

A Tabela 12 contém para cada o parâmetro, a unidade, os métodos e as referências bibliográficas usadas.

Tabela 12 – Categorias de impacto, parâmetro, unidade, métodos e referências bibliográficas

Categoria de Impacte	Parâmetro	Unidade (expressa por unidade funcional)	Métodos e referências bibliográficas
Aquecimento global	Potencial de aquecimento global, GWP;	kg CO <sub>2</sub> eq	CML-IA (Leiden University, 2012)
Acidificação do solo e da água	Potencial de acidificação do solo e água, AP;	kg SO <sub>2</sub> eq	CML-IA (Leiden University, 2012)
Eutrofização	Potencial eutrofização, EP;	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	CML-IA (Leiden University, 2012)
Depleção da camada de ozono	Potencial de depleção da camada de ozono estratosférica, ODP;	kg CFC 11 eq	CML-IA (Leiden University, 2012)
Formação de ozono fotoquímico	Potencial de formação de ozono troposférico, POCP;	kg Eteno eq	CML-IA (Leiden University, 2012)
Depleção de recursos abióticos - elementos	Potencial de depleção de recursos abióticos para recursos não-fósseis, ADPe;	kg Sb eq	CML-IA (Leiden University, 2012)
Depleção de recursos abióticos – fósseis	Potencial de depleção de recursos abióticos para recursos fósseis, ADPf;	MJ, poder calorífico inferior (P.C.I.)	CML-IA (Leiden University, 2012)
Toxicidade humana, efeito cancerígeno	Potencial toxicidade humana, efeito cancerígeno, HTc;	CTUh	ILCD (EC-JRC, 2012)
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno;	Potencial toxicidade humana, efeito não-cancerígeno, HTnc;	CTUh	ILCD (EC-JRC, 2012)
Matéria particulada	Matéria particulada – expressa PM2.5, PM;	kg PM2.5 eq	ILCD (EC-JRC, 2012)
Uso do solo	Potencial de uso do solo, LU	kg C deficit	ILCD (EC-JRC, 2012)
Depleção da água	Potencial de depleção de recursos água, WD	m <sup>3</sup> water eq	ILCD (EC-JRC, 2012)
Ecotoxicidade	Potencial de ecotoxicidade, ET	CTUh	ILCD (EC-JRC, 2012)
Acidificação (AP+)	Potencial de acidificação do solo e água, AP+	molc H <sup>+</sup> eq	ILCD (EC-JRC, 2012)
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	Potencial de formação de ozono troposférico, POCP+	kg COVNM e	ILCD (EC-JRC, 2012)

### 4.1.3 Resultados e discussão

As tabelas A.1 a A.4 (no anexo A.3) apresentam o potencial impacte ambiental calculado para a parede de tijolo com os diversos cenários de combustíveis utilizados (BIO - biomassa, CP – coque de petróleo, BIO+CP – 50% biomassa e 50% coque de petróleo e GN – gás natural), usando a ACV e o conjunto de métodos de avaliação de impactes referidos anteriormente (CML-IA e ILCD) para a unidade funcional ( $1 \text{ m}^2$ ) e para a unidade declarada ( $1 \text{ kg}$ ) na abordagem do “berço ao túmulo”. As tabelas A.5 a A.8 apresentam a mesma tipologia de informação mas na abordagem do “berço ao portão” (A1 a A3). Nestes resultados foram excluídas das fronteiras do sistema, a produção e manutenção de bens de capital, tais como edifícios, maquinaria, equipamentos, etc.

#### 4.1.3.1 Abordagem do berço ao túmulo

Da Figura 13 à Figura 27 representa-se a contribuição relativa de cada etapa do ciclo de vida para o impacte ambiental total, de cada uma das categorias de impacte ambiental em estudo, com base na abordagem modular da EN 15804+A1:2013 (ver Tabela 3), incluindo etapa de produto (A1 a A3), transporte de produto (A4), construção e instalação (A5), utilização (B) até à etapa C (fim de vida), ou seja do “berço ao túmulo”.

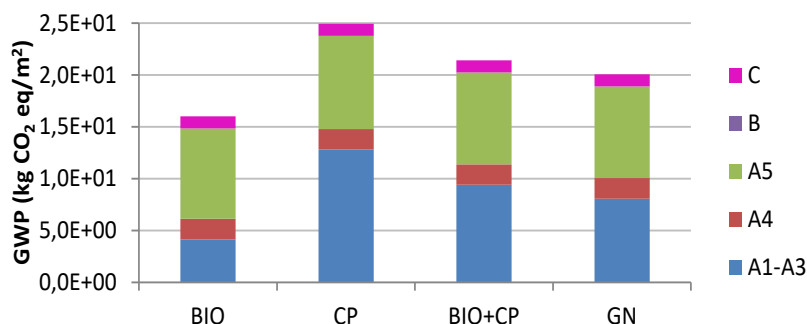


Figura 13 – Contributo de cada etapa para o aquecimento global (GWP) por  $\text{m}^2$  de parede tijolo

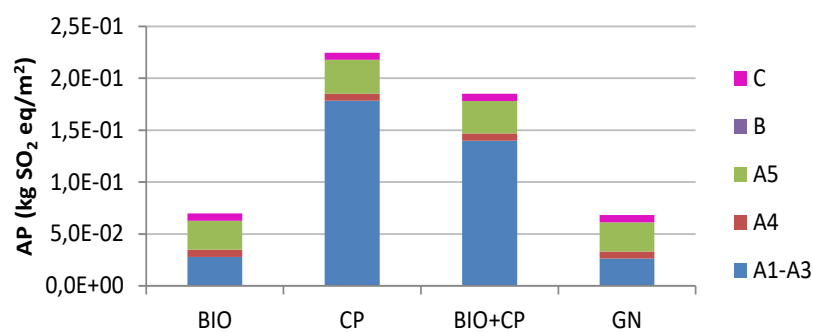


Figura 14 – Contributo de cada etapa para a acidificação (AP) por m² de parede de tijolo

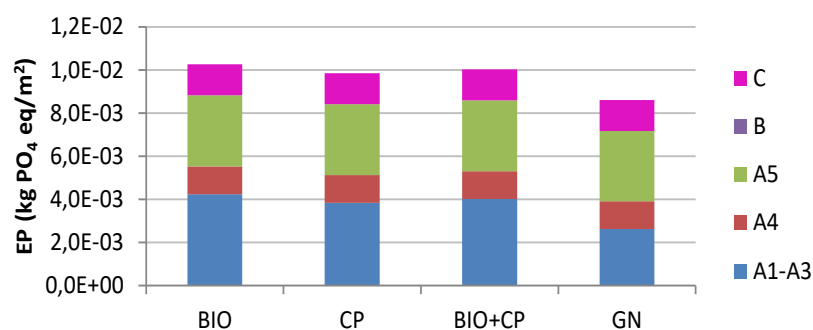


Figura 15 – Contributo de cada etapa para a eutrofização (EP) por m² de parede de tijolo

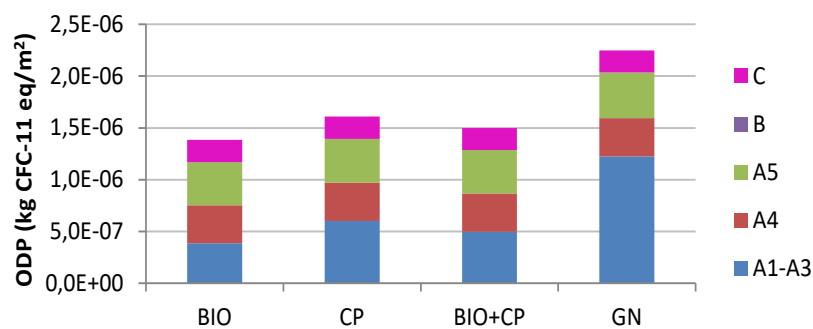


Figura 16 – Contributo de cada etapa para a depleção da camada de ozono (ODP) por m² de parede de tijolo



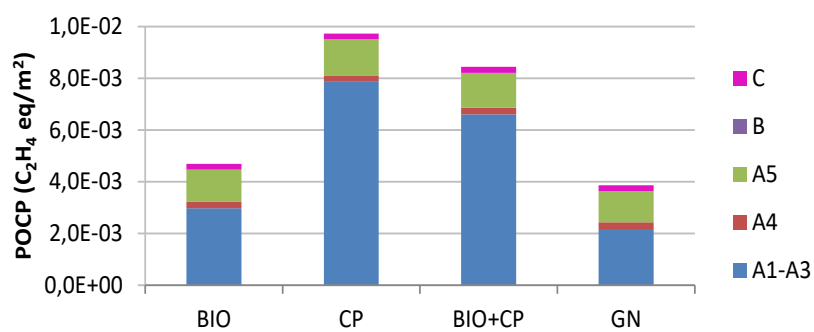


Figura 17 – Contribuição de cada etapa para a oxidação fotoquímica (POCP) por m² de parede de tijolo

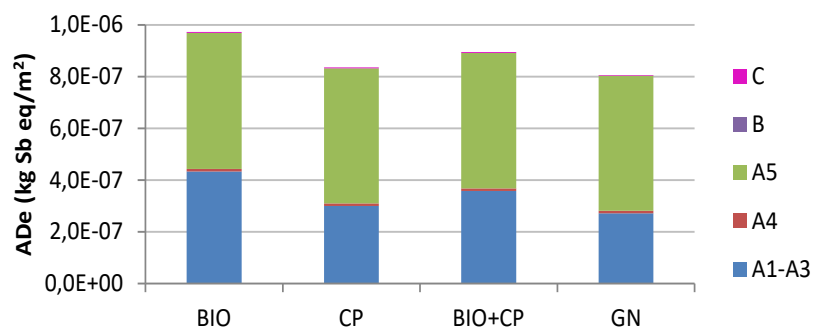


Figura 18 – Contribuição de cada etapa para a depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por m² de parede de tijolo

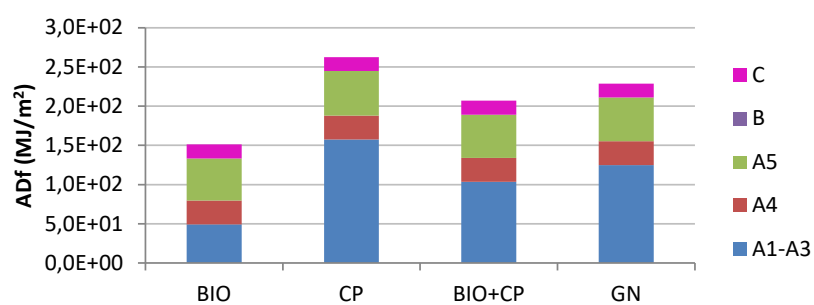


Figura 19 – Contribuição de cada etapa para a depleção de recursos – fósseis (ADf) por m² de parede de tijolo

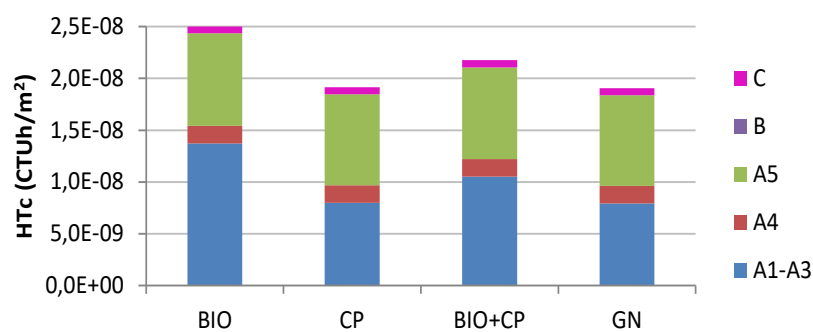


Figura 20 – Contribuição de cada etapa para a toxicidade humana – cancerígena (HTc) por m² de parede de tijolo

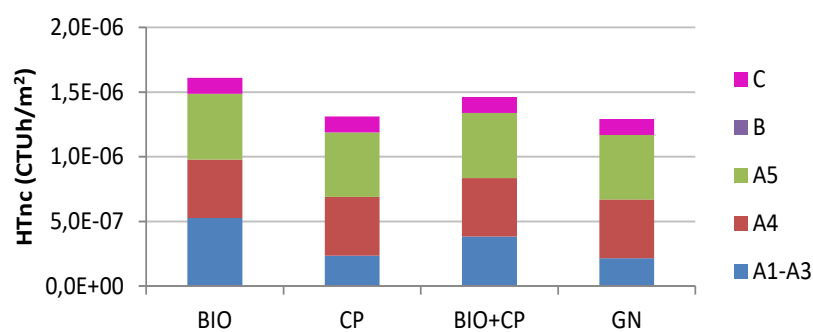


Figura 21 – Contribuição de cada etapa para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m² de parede de tijolo

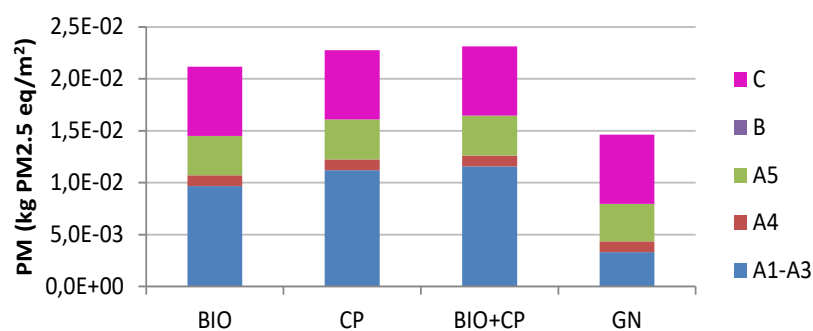


Figura 22 – Contribuição de cada etapa para partículas (PM2.5) por m² de parede de tijolo

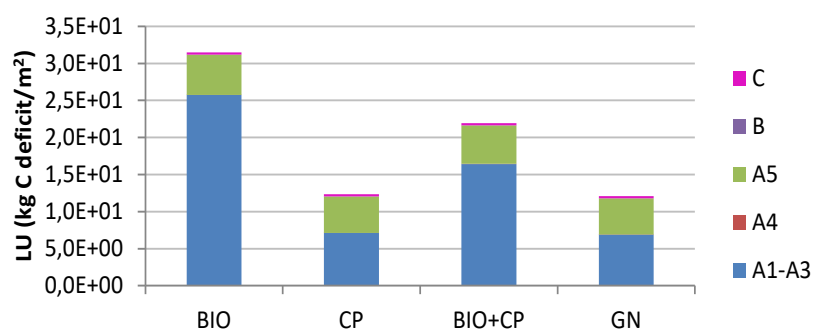


Figura 23 – Contribuição de cada etapa para uso do solo (LU) por m² de parede de tijolo

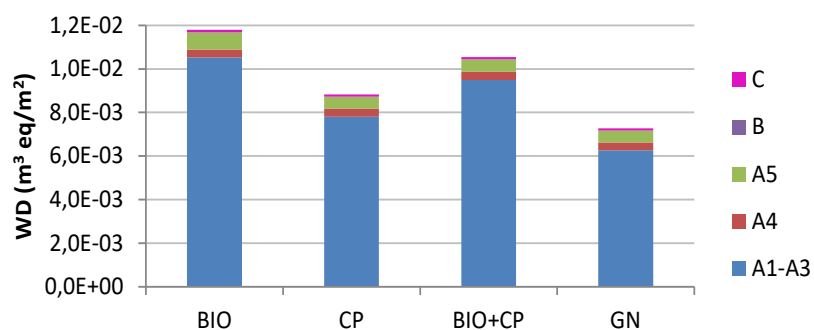


Figura 24 – Contribuição de cada etapa para depleção da água (WD) por m² de parede de tijolo

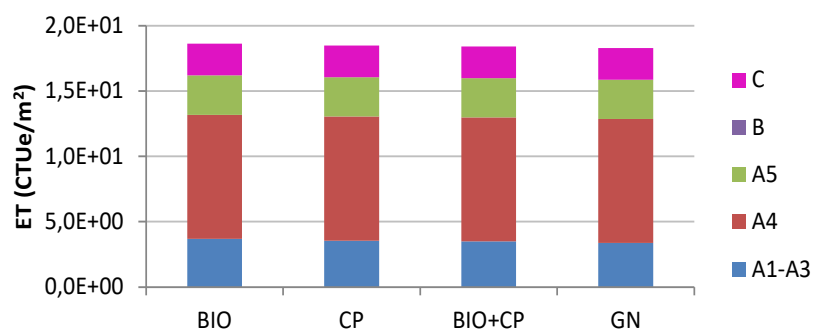


Figura 25 – Contribuição de cada etapa para ecotoxicidade (ET) por m² de parede de tijolo

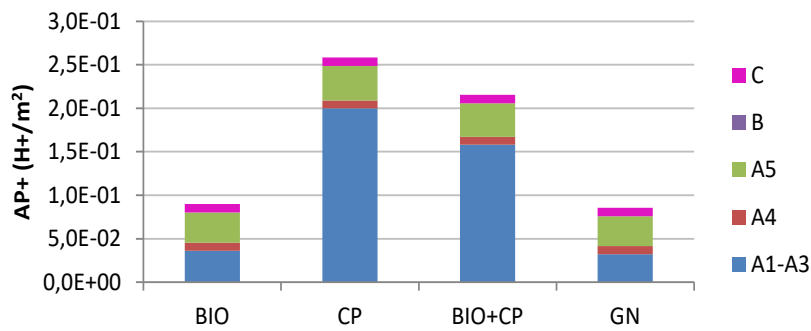


Figura 26 – Contribuição de cada etapa para acidificação pelo método ILCD (AP+) por m² de parede de tijolo

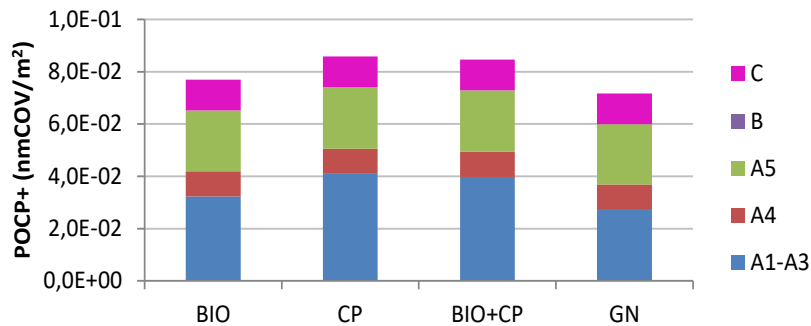


Figura 27 – Contribuição de cada etapa para oxidação fotoquímica pelo método ILCD (POCP+) por m² de parede de tijolo

### i. Análise geral

Da análise dos resultados expressos da Figura 14 à Figura 27 verifica-se que:

- os menores impactos são atingidos quando se utiliza o gás natural (maioria das categorias de impacto) ou a biomassa (aquecimento global, depleção da camada de ozono, depleção de recursos fósseis);
- para o aquecimento global, a depleção da camada de ozono e a depleção abiótica de recursos fósseis, o melhor desempenho é obtido com a biomassa, tal como esperado face à natureza deste recurso energético renovável;
- já para a acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica, depleção abiótica de elementos, toxicidade humana (HTc e HTnc), partículas, ecotoxicidade, uso do solo e a depleção da água, o menor valor foi alcançado no cenário do gás natural, embora alguns valores estejam na mesma ordem de grandeza dos obtidos para a biomassa. Comportamento explicado por o gás natural (e consequentemente a sua queima) possuir um valor residual de enxofre, compostos orgânicos voláteis, metais

pesados e cinzas, substâncias que contribuem para o impacto das categorias em estudo;

- os maiores impactos ambientais foram obtidos, na maioria dos casos, para o cenário do coque de petróleo. No entanto, para a eutrofização, toxicidade humana, uso do solo, depleção da água e ainda para a depleção abiótica de elementos a biomassa apresenta o pior desempenho, atendendo à natureza das atividades de cultivo e colheita. Já o gás natural apresenta o pior desempenho apenas para a depleção da camada de ozono, atendendo aos arrefecimentos necessários na extração e processamento do gás natural.

### ii. Contributo de cada etapa

A etapa de produto (A1, A2 e A3) é a mais relevante para a maioria das categorias de impacto ambiental em estudo, exceto depleção abiótica de elementos (onde A5 representa de 54% a 65%), ecotoxicidade (com a distribuição (A4) como a mais relevante com 50 a 52%), aquecimento global (apenas quando se utiliza biomassa onde a instalação (A5) representa 54% do impacto total), eutrofização (A5 é a mais significativa apenas para o uso de gás natural) e partículas (PM2.5) (etapa C com 46% com uso de gás natural).

A etapa de construção (A4 e A5) é a mais relevante para a ecotoxicidade e para a depleção de recursos abióticos. O transporte/distribuição do produto (A4) é a mais relevante para a ecotoxicidade (na ordem dos 51-52%) devido ao consumo de gásóleo e emissões gasosas da combustão (alguns metais pesados libertados). O módulo A4 apresenta-se ainda como o segundo mais relevante para algumas das categorias de impacto como seja a toxicidade humana não cancerígena (na ordem dos 28-35%), depleção da camada de ozono (16-27%), depleção de recursos fósseis (13-20%), aquecimento global (8-12%), eutrofização (13-15%), e oxidação fotoquímica (ILCD) (11-13%).

O módulo de construção (A5), influenciada pelo fabrico e colocação da argamassa e pelas perdas de tijolo em obra (assumido o valor de 3%), representa a etapa mais relevante para a depleção de recursos abióticos e em situações pontuais (aquecimento global quando é utilizada a biomassa; eutrofização quando se usa o gás natural). Este módulo A5 constitui a segunda posição mais relevante para todas as restantes categorias (com contributos moderados que vão, em regra, de 15% a 41%).

A etapa de utilização (B), não é relevante para o desempenho ambiental do tijolo cerâmico, tal como seria de esperar, pois não há consumo de materiais ou energia durante esta etapa, nem libertação de emissões.

Por fim, a etapa de fim de vida (C) é a mais relevante apenas para a categoria de impacto das partículas (PM2.5) para o gás natural (51%) e a segunda mais relevante para os

restantes casos (34 a 36%) explicada pela tipologia de ações desenvolvidas na demolição e desconstrução e consequentes impactes na qualidade do ar.

Adicionalmente constata-se que, o comportamento determinado pelos dois conjuntos de métodos distintos (CML-IA e ILCD) é muito semelhante para a acidificação por tipologia de combustível e por etapa do ciclo de vida. No entanto, para a oxidação fotoquímica verificam-se diferenças entre o CML-IA e o ILCD, pois apesar do comportamento ser semelhante para os diferentes combustíveis, é distinto o contributo para as diferentes etapas (nomeadamente A4 e C), explicado por os métodos atribuírem diferentes fatores de caracterização e considerarem algumas substâncias diferentes (por exemplo o COVs, COVNM e NOx apenas considerados no ILCD).

### iii. Evolução temporal

Na Tabela 13 encontram-se os impactes determinados, para os mesmos produtos nas mesmas unidades fabris no ano de 2008 (Almeida et al., 2015b), tendo sido selecionadas as categorias de impacto passíveis de serem comparadas com as determinadas em 2016 (ver tabelas A.1 e A.2 em anexo), de forma a ser possível aferir a evolução temporal dos impactes. Não é possível efetuar algumas comparações como por exemplo para a depleção de recursos elementos, nem para a depleção da água, uma vez que os fatores de caracterização previstos no método e as substâncias incluídas no CML sofreram evoluções de um estudo para o outro e por conseguinte estes indicadores medem realidades distintas.

Tabela 13 – Impacte potencial da parede de tijolo cerâmico dados 2008 (Fonte: Almeida et al., 2015b)

Categoria de impacto	Unidade Declarada: 1 kg tijolo			Unidade Funcional: 1 m <sup>2</sup> tijolo			Unidade
	BIO	CP	GN	BIO	CP	GN	
Acidificação (AP)	6,84E-04	3,62E-03	6,66E-04	4,89E-02	2,59E-01	4,77E-02	kg SO <sub>2</sub> eq
Eutrofização (EP)	1,05E-04	1,41E-04	7,10E-05	7,48E-03	1,01E-02	5,08E-03	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq
Aquecimento global (GWP)	1,32E-01	3,03E-01	2,09E-01	9,47E+00	2,17E+01	1,50E+01	kg CO <sub>2</sub> eq
Depleção da camada de ozono (ODP)	1,01E-08	3,86E-08	2,01E-08	7,20E-07	2,76E-06	1,44E-06	kg CFC-11 eq
Oxidação fotoquímica (PO)	6,11E-05	1,52E-04	4,05E-05	4,37E-03	1,09E-02	2,90E-03	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	1,26E+00	4,29E+00	2,60E+00	9,03E+01	3,07E+02	1,86E+02	MJ eq

BIO – biomassa; CP – coque de petróleo; GN – gás natural

Da análise da Tabela 14 verifica-se que:

- a) Para a biomassa e para o gás natural a evolução é desfavorável de 2008 para 2016 (agravamento entre os 5 e os 30% nos impactes), associado a uma menor eficiência do processo, já que se mantêm os mesmos equipamentos principais (secadores e fornos) que vão perdendo eficiência com o tempo, agravada com uma produção realizada por campanhas muito curtas e com recurso apenas a uma linha de fabrico mantendo a outra parada (sem economias de escala). É de mencionar taxas de utilização da capacidade instalada nas fábricas em estudo de 20% a 27% em 2016, bem inferiores a 2008 (70% a 80%) face à crise económica. No entanto, o mix elétrico nacional evoluiu favoravelmente de 2008 para 2016, com uma maior penetração de fontes de energia renováveis face às de origem fóssil.
- b) No coque de petróleo os impactes evoluíram de modo favorável de 2008 para 2016 (reduções entre os 0% e os 20% nos impactes), associados quer ao modo de utilização deste combustível (sob a forma micronizada cuja combustão é mais eficiente face à anterior a granel), quer por outro lado, aos dados de produção de coque de petróleo disponibilizados na base de dados Ecoinvent. Assim, a versão Ecoinvent 3.3 (utilizada para os dados recentes de 2016) e a versão Ecoinvent 2.2 (utilizada nos dados de 2008) adotam procedimentos de alocação diferentes (económica e mássica, respetivamente) sendo os impactes inferiores na versão mais recente pois o coque é um subproduto de baixo valor.

### 4.1.3.2 Abordagem do berço ao portão

Constituindo a etapa do berço ao portão (A1-A3) a mais representativa para a maioria das categorias de impacto, foram avaliados os contributos de cada um dos processos que a compõem (Figura 28 a Figura 42) nomeadamente para a:

- produção de matérias-primas e auxiliares (argila, areia e materiais auxiliares para manutenção), designada abreviadamente na legenda por “Prod. MP e aux”;
- produção de materiais de embalagem (cartão, plástico e paletes de madeira), designada na legenda por “Prod. embalagem”;
- produção de combustíveis (biomassa, coque de petróleo, gás natural, e gasóleo), designada na legenda por “Prod. combustíveis”;
- produção de eletricidade, designada na legenda por “Prod. eletricidade”;
- tratamentos de água, água residual e resíduos, designada na legenda por “Tratamento emissões”;

- atividades decorrentes na fábrica (ou seja decorrentes do processo de fabrico cerâmico), designada na legenda por “Atividades na fábrica”; e
- as atividades de transporte (transporte de matérias-primas e materiais auxiliares dos locais de extração e/ou processamento para a fábrica), designada na legenda por “Transporte”.

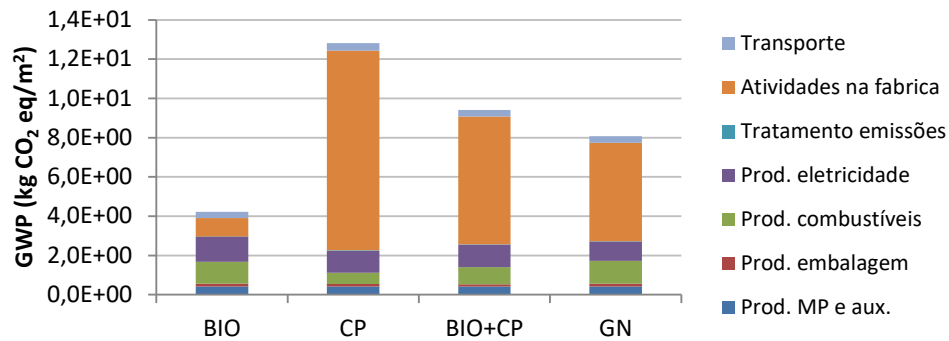


Figura 28 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para o GWP por m² de parede de tijolo

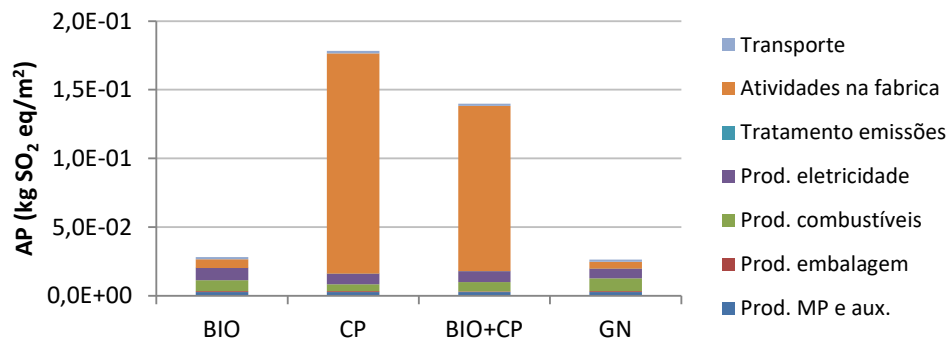


Figura 29 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a AP por m² de parede de tijolo

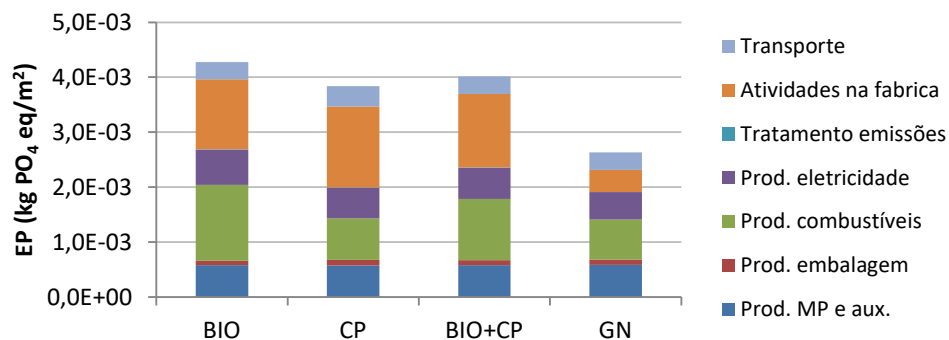


Figura 30 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a EP por m² de parede de tijolo



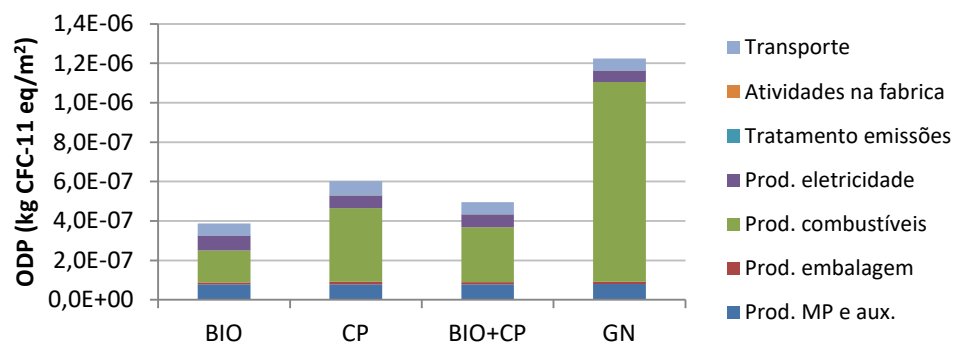


Figura 31 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a ODP por m² de parede de tijolo

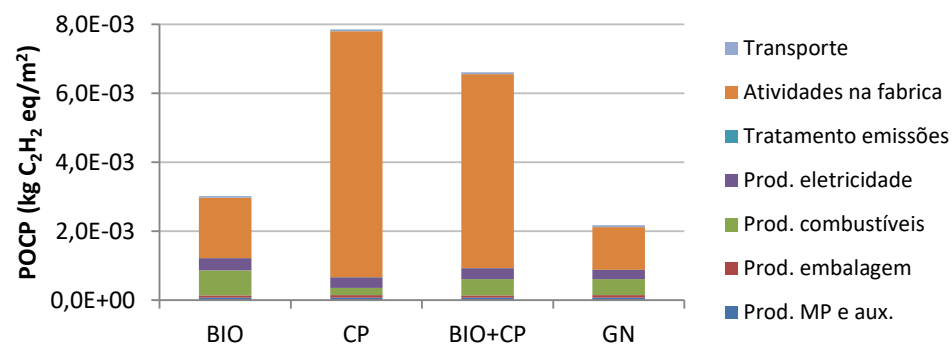


Figura 32 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a POCP por m² de parede de tijolo

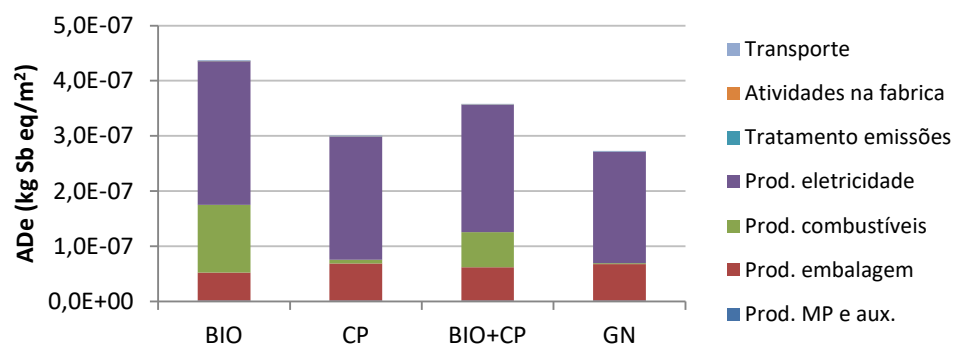


Figura 33 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a ADe por m² de parede de tijolo

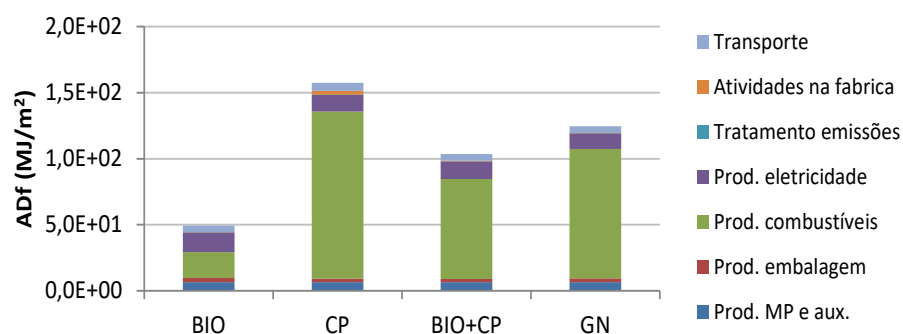


Figura 34 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a ADf por m² de parede de tijolo

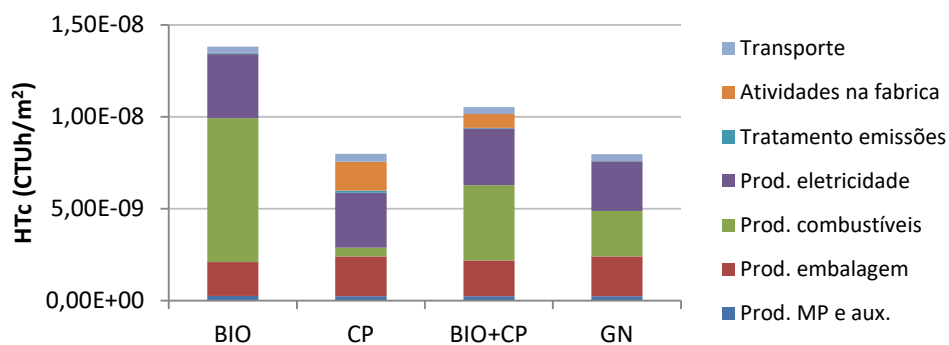


Figura 35 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a HTc por m² de parede de tijolo

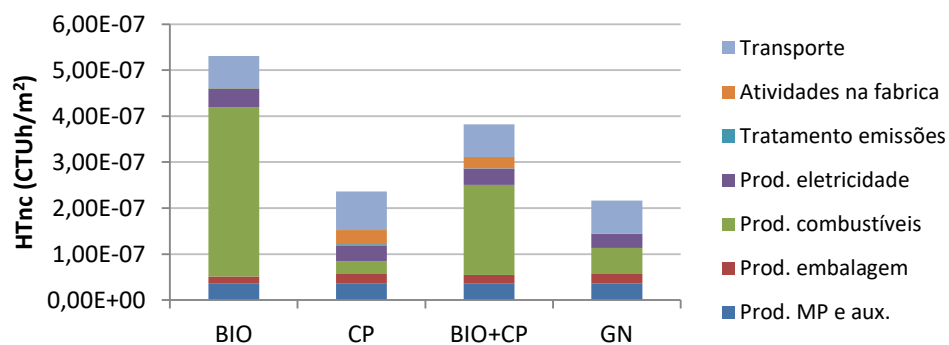


Figura 36 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a HTnc por m² de parede de tijolo

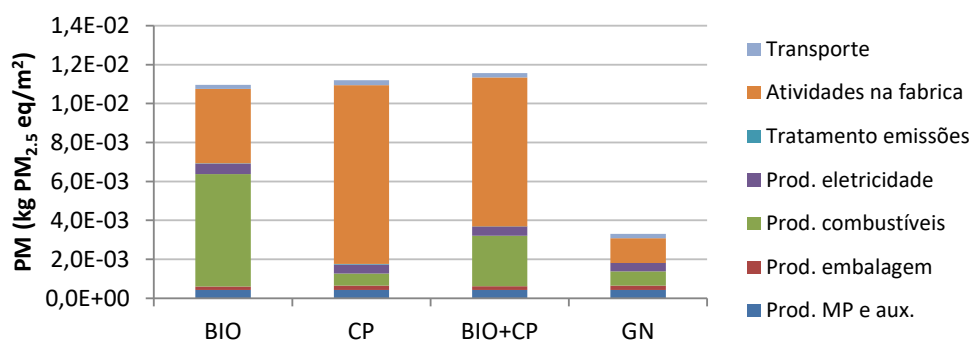


Figura 37 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para PM2.5 por m² de parede de tijolo

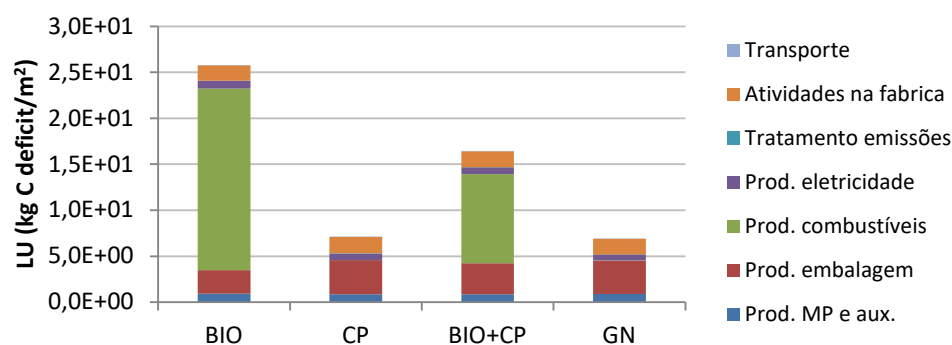


Figura 38 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para o LU por m² de parede de tijolo

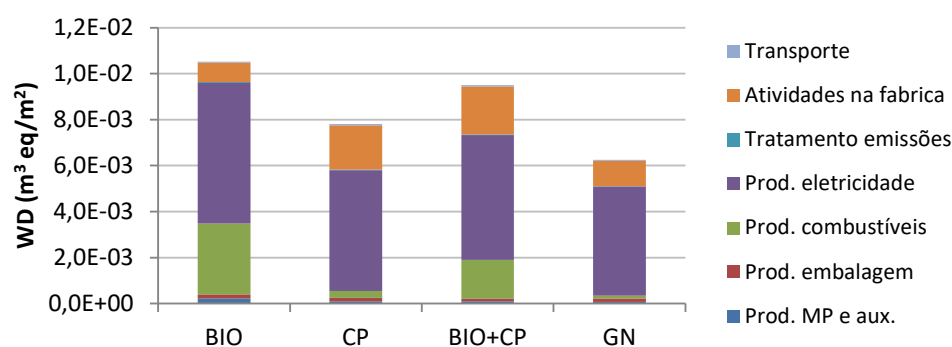


Figura 39 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a WD por m² de parede de tijolo

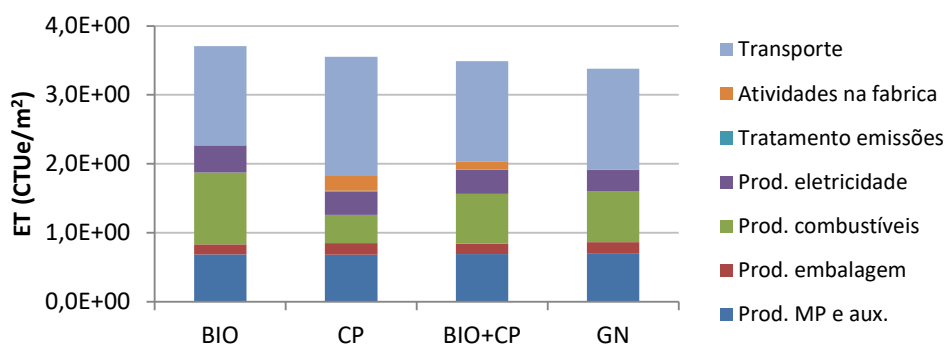


Figura 40 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a ET por m² de parede de tijolo

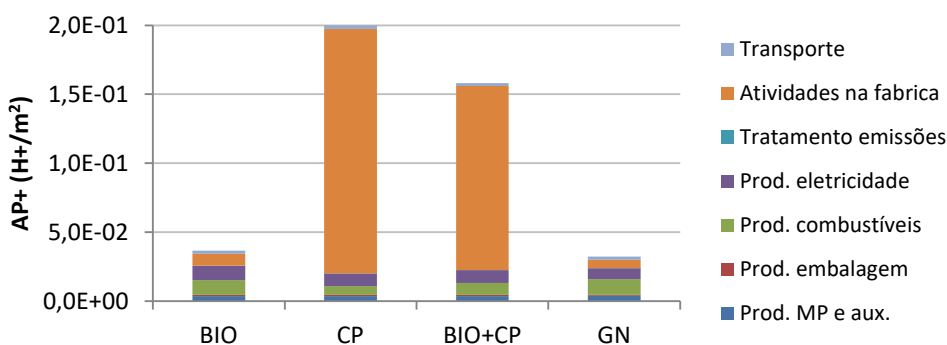


Figura 41 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a AP+ (ILCD) por m² de parede de tijolo

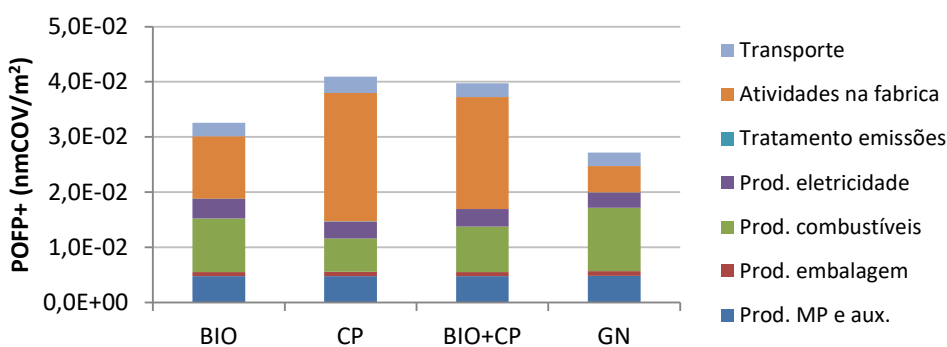


Figura 42 – Contributo dos processos do “berço ao portão” para a POCP+(ILCD) por m² de parede de tijolo

### i. Comportamento por categoria de impacto

No que se refere ao aquecimento global verifica-se que as “atividades na fábrica” são o processo mais relevante (49 a 79%). O menor valor desta categoria de impacto é atingido para a biomassa, tal como seria de prever face à neutralidade das emissões de CO<sub>2</sub> (balanço com o sequestro de CO<sub>2</sub> durante a fotossíntese), enquanto para o coque de petróleo se atinge o maior valor face a uma emissão superior de CO<sub>2</sub> (responsável por mais de 94 a 98% das emissões nesta categoria).

Também na acidificação (CML-IA e ILCD) se verifica o domínio das “atividades na fábrica” (86% a 90%) para as empresas que utilizam o coque de petróleo, enquanto nas restantes este processo é menos relevante. Este comportamento é explicado pelo teor de enxofre superior no coque face aos restantes combustíveis. Assim, durante a cozedura do tijolo verifica-se uma emissão de SO<sub>2</sub> superior, sendo este o maior contribuinte (50% a 90%) para esta categoria, seguindo-se o NO<sub>x</sub>. No caso da biomassa e do gás natural verifica-se ainda alguma relevância para a “produção de combustíveis”.

Na eutrofização verifica-se que a diferença entre combustíveis (biomassa e/ou o coque) é menos pronunciada, e está associada às “atividades na fábrica” (33 a 38%) particularmente a cozedura à qual está associada a emissão de NO<sub>x</sub> (principal contribuinte), seguindo-se a “produção de combustível”. Já com o gás natural atingem-se os menores valores de eutrofização, sendo a “produção de combustível” e a “produção de matérias-primas e auxiliares” as mais relevantes.

Na depleção da camada de ozono, o comportamento é distinto, com o tijolo produzido com gás natural a atingir os maiores valores, associado ao uso de gases de refrigeração com substâncias depletoras da camada de ozono para o arrefecimento do gás natural durante a “produção combustíveis”. O maior contribuinte é o bromotrifluorometano (Halon 1301) seguindo-se o bromoclorodifluormetano (Halon 1211).

A oxidação fotoquímica (CML-IA e ILCD) segue um comportamento muito semelhante ao descrito para a acidificação com a preponderância das “atividades na fábrica” (57% a 91%) e com os maiores valores a serem atingidos para o coque face à maior emissão de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO e COV na cozedura. A produção de combustíveis e de eletricidade também contribuem mas de um modo menos expressivo.

No que respeita à depleção de recursos (elementos), a “produção da eletricidade” é o maior contribuinte (59 a 74%). Neste caso verifica-se que a biomassa apresenta o maior impacto associado ao maior consumo específico de eletricidade (dada a necessidade de moagem da biomassa na fábrica), seguindo-se o cenário misto de biomassa e coque. Salienta-se ainda o contributo da “produção de combustíveis” para os cenários com biomassa.

Já para a depleção de recursos fósseis, a “produção de combustíveis” é o processo mais relevante (superior a 70%) particularmente para o coque (mais significativo) e gás natural, e o menor para a biomassa tal como seria de esperar face à natureza renovável deste combustível.

No caso da toxicidade humana (HTc e HTnc) registam-se os maiores valores para a biomassa, mas verifica-se pouca homogeneidade do contributo dos diferentes processos nos vários cenários de combustível. Assim, os processos de “produção de combustíveis”, “produção da eletricidade” e “produção de embalagem” são os mais relevantes para a toxicidade humana cancerígena, enquanto para a não cancerígena para além da “produção de combustíveis” (mais significativa no caso da biomassa), os “transportes” também apresentam um contributo notório. Verifica-se que os metais pesados são os que mais contribuem para a toxicidade humana, particularmente o crómio, mercúrio, arsénio para HTc; e o zinco, mercúrio, e chumbo para HTnc.

No caso das partículas (PM2.5) verifica-se que o menor valor é o obtido para o gás natural, tal como seria de esperar uma vez que é aquele que possui um menor teor de cinzas e consequentemente possui uma menor emissão de partículas durante a queima (processo mais relevante).

Já para o uso do solo verifica-se que a “produção de embalagem” (particularmente paletes de madeira) é muito relevante (52%) mas apenas para o coque e o gás natural. Já a “produção de combustíveis” é a mais relevante nos tijolos cozidos com biomassa (pela natureza de “produção” deste combustível).

Para a depleção da água a “produção de eletricidade” assume-se como a mais relevante, o que deverá estar associado às necessidades de arrefecimento nas centrais termoelétricas. De mencionar no entanto que os maiores valores atingem-se nos cenários a biomassa, explicadas pelas necessidades deste recurso para a produção deste combustível.

Em síntese, da análise da Figura 28 à Figura 42 pode-se constatar que:

- a “produção de matérias-primas e auxiliares” não é preponderante para nenhuma das categorias de impacto;
- a “produção de embalagem” é o processo dominante para o uso do solo (52%) mas apenas para o coque e o gás natural, originado pelas paletes de madeira (e em menor escala o plástico);
- a “produção de combustíveis” assume a maior relevância para a depleção de recursos fósseis; depleção da camada de ozono (face aos necessários arrefecimentos do gás natural); toxicidade (cenários com biomassa); uso do solo (cenários com biomassa) e para as partículas (PM2.5) (no cenário de biomassa);

- a “produção da eletricidade” é o processo dominante para a depleção de recursos elementos e depleção da água. Para o estudo de caso da biomassa, é ainda maioritário para o aquecimento global e a acidificação, justificado pelo maior consumo específico de eletricidade face à necessidade adicional de preparação deste combustível (moagem);
- o “tratamento de águas, águas residuais, resíduos” é o processo menos relevante para todas as categorias de impacte (representando menos de 0,5%) tal como seria de esperar;
- as “atividades na fábrica” são dominantes para o aquecimento global; acidificação e eutrofização nos cenários de uso de coque; oxidação fotoquímica (CML-IA) e partículas (PM2.5) exceto biomassa;
- o “transporte” é o processo dominante para a ecotoxicidade e de um modo moderado para a toxicidade humana (não cancerígena).

## ii. Contributo da infraestrutura

A Tabela 14 mostra a contribuição das infraestruturas (produção e manutenção de bens de capital), expressa em percentagem, nos resultados totais da abordagem do berço ao portão (A1-A3), para os diversos estudos de caso por forma a avaliar a sua influência.

Tabela 14 – Contributo das infraestruturas na abordagem do berço ao portão do tijolo (%)

Categoria de impacte	BIO	CP	BIO+CP	GN
Aquecimento global (GWP)	12	4	5	6
Acidificação (AP)	12	2	3	12
Eutrofização (EP)	13	13	13	18
Oxidação fotoquímica (POCP)	7	3	3	9
Depleção da camada de ozono (ODP)	14	9	11	5
Depleção de recursos abióticos - elementos (ADe)	97	98	98	98
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	12	10	11	5
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	82	88	85	88
Toxicidade humana, efeito não- cancerígeno (HTnc)	30	47	36	48
Matéria particulada (PM2.5)	6	5	5	14
Uso do solo (LU)	28	64	41	65
Depleção da água (WD)	1	0	0	0
Ecotoxicidade (ET)	23	22	23	23
Acidificação (ILCD) (A+)	12	2	3	12
Formação de ozono fotoquímico (ILCD) (POCP +)	8	6	6	9

A Tabela 14 evidencia que as infraestruturas, estimadas com o contexto nacional (adaptado do existente no Ecoinvent 3), possuem desde uma influência residual até uma expressiva, verificando-se que, para cada categoria de impacto, o comportamento é análogo em todos os cenários de combustível para os tijolos em estudo não existindo diferenças significativas por tipologia de combustível em utilização (exceto no uso do solo onde a biomassa possui uma menor influência tal como esperado face à sua natureza e modo de produção na floresta). Este comportamento estará associado à extração de recursos para fabrico da diversa maquinaria (metálica em aço e em ferro, etc.), e da própria fábrica (constituída maioritariamente por tijolo e betão).

Finalmente de mencionar que, na realização de uma DAP usualmente não se incluem as infraestruturas, no entanto e pelo menos para a depleção de recursos abióticos, uso do solo, toxicidade humana e ecotoxicidade, estas infraestruturas poderão ser relevantes.

#### **4.1.3.3 Comparação e discussão com outros estudos**

De acordo com o descrito no capítulo 3.2.1 todos os estudos relatam o consumo elevado de energia na etapa de fabrico do tijolo cerâmico (processo de produção), especialmente no processo de cozedura. Na Tabela 15 constam os resultados dos estudos efetuados anteriormente, tendo-se optado por colocar apenas aqueles que possuem resultados absolutos (e com métodos comparáveis), que foram convertidos para a unidade declarada (1 kg) de forma a tornar mais fácil a sua comparação, sendo esta também uma unidade comum na contabilização da produção (contabilizada em tonelagem nas fábricas).

De um modo geral, verifica-se que os resultados obtidos neste estudo são consistentes com os resultados obtidos noutros estudos afins de tijolo cerâmico, mencionados na Tabela 15, verificando-se que o melhor desempenho obtido por categoria de impacto no presente estudo (atingido para o gás natural ou para a biomassa) é também melhor que a maioria dos restantes resultados de estudos existentes.

Neste contexto, o valor obtido por Koroneos e Dompros (2007) para o aquecimento global (com fatores de caracterização afins) é maior do que o obtido para a utilização de coque de petróleo em Portugal, na abordagem do berço ao portão (A1-A3). De mencionar porém que a utilização deste combustível em Portugal tem evoluído nas últimas décadas, tratando-se de um combustível fóssil sólido, derivado do petróleo, que se obtém como subproduto aquando da destilação do petróleo (fundo da coluna de destilação), num processo designado “cracking térmico” (Almeida et al., 2003), sendo que na atualidade este combustível é pré-processado e micronizado, facilitando uma combustão mais completa. Quanto à acidificação e eutrofização, estes autores (Koroneos and Dompros, 2007) obtiveram valores ligeiramente inferiores, embora na mesma ordem de grandeza do presente estudo, refletindo provavelmente um teor de enxofre no combustível utilizado em Portugal ligeiramente superior (não se encontrando explícito o teor de enxofre no estudo grego).



## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela 15 – Comparação de resultados de vários estudos com tijolo cerâmico

	Unid.	Koroneos e Dompros (2007)	Rouwette (2010)	Bribián et al. (2011)	Almeida et al. (2014)	Brick development association (2013)	Souza et al. (2016)
Abordagem da ACV	--	Berço ao portão	Berço ao túmulo	Berço ao túmulo	Berço ao túmulo	Berço ao portão	Berço ao túmulo
Método de AICV	--	CED Eco-indicator 95	CED	CED + IPCC	CML + CED + Impact 2000	CML 2001 (fatores de 2013)	Impact 2002 + ReCiPe (H)
Cobertura geográfica	--	Grécia	Austrália	Espanha	Portugal	Reino Unido	Brasil
Cobertura temporal	--	--	--	--	2008 (4 empresas)	2005 (4 empresas)	2011-2012
Tempo de vida	--	--	+50	--	50	--	40
Unidade funcional	--	1000 kg	1 tijolo e 1kg	1 kg	1 m <sup>2</sup> (71,6 kg)	1000 kg	1 m <sup>2</sup> (97,5 kg)
Unidade referência	--	1 kg – os estudos consideram os impactes por unidade funcional, porém foram convertidos para 1 kg para fins comparativos					
Combustível cozedura	--	Coque de petróleo	Gás natural	Não identificado	3 casos (biomassa, coque e gás natural)	4 estudos de caso a gás natural	Biomassa
Categorias de impacte relevantes		GWP, ADe, AP, EP	ADe, GWP	ADe, GWP	GWP, AP, EP, ODP, RI, POCP, ADe, ADe e WD	GWP, AP, EP, ODP, POCP, ADe, ADe	Todos impact 2000+ e ReCiPe
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	2,21E-01	1,99E-1/3,00E-1	271	1,32E-01 a 3,03E-01	1,58E-01	3,28E-01
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	2,23E-03	--	--	6,66E-04 a 3,62E-03	1,35E-03	1,33E-03
EP	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	4,30E-05	--	--	7,0E-05 a 1,41E-04	5,00E-05	7,86E-05
ODP	kg CFC 11 eq	--	--	--	1,01E-08 a 3,68E-08	0,00E+00	3,49E-08
POCP	kg eteno eq	--	--	--	4,05E-05 a 1,52E-04	7,50E-05	--
POCP	kg –COVNM	--	--	--	1,00E-03 a 1,20E-03	--	2,05E-03
ADe	MJ	--	3,10E+0 / 4,20E+0	4,59E+00	1,26E+00 a 4,29E+00	2,84E+00	4,03E+00
ADe	kg Sb eq	--	--	--	6,25E-04 a 1,96E-03	0,00E+00	--
Depleção da água	m <sup>3</sup>	--	--	--	9,13E-01 a 9,31E-01	--	1,33E-02
Partículas	kg PM2.5 eq	--	--	--	5,46E-04 a 8,38E-04	--	--

No que se refere ao uso de gás natural na cozedura de tijolo cerâmico, os resultados obtidos nos estudos de ACV de tijolos fabricados com recurso ao gás natural na Austrália (Rouwette, 2010), em Espanha (Bribián et al., 2011) e no Reino Unido (BDA, 2014) são coerentes com os apresentados neste estudo. Estes resultados, apesar de se apresentarem com uma ordem de grandeza afim, são geralmente superiores (podendo mesmo atingir o triplo) aos obtidos para os tijolos portugueses fabricados com o gás natural, explicado pela maior temperatura de cozedura (tijolos com maior densidade) e também pelo facto das argilas inglesas conterem mais enxofre.

O estudo australiano refere que as emissões de GEE, durante o ciclo de vida de uma parede de tijolos, são dominadas pelo processo de fabricação de tijolos (A1-A3) (68%), enquanto a demolição da parede contribui com menos de 1% para as emissões totais de GEE. Já Bribián et al. (2011) inventariaram um consumo de água de 1 890 l / kg para todas as etapas do ciclo de vida, que é maior do que os dados obtidos neste estudo, refletindo eventualmente um teor de humidade da matéria-prima maior e/ou maior consumo de água na etapa de instalação. Porém esse estudo não especifica detalhes tecnológicos de fabrico nem detalhes dos cenários nem da produção da eletricidade pelo que a comparação torna-se limitada.

Por fim, verificou-se que os valores obtidos para o tijolo brasileiro cozido com biomassa no ano de 2011 e 2012 (Souza et al., 2016), apresenta para as categorias consideradas valores que são superiores quer por m<sup>2</sup> quer por kg (ver Tabela 15) ao do presente estudo, exceto para a eutrofização, embora a diferença seja menor por kg (em regra de 36 a 90%), uma vez que a parede portuguesa possui uma menor massa por m<sup>2</sup>. Este fato deverá estar associado à tecnologia nacional mais avançada, em termos de eficiência da tecnologia de fabrico, modo de cozedura, sistemas de recuperação de energia, controlo da combustão e emissões gasosas, uma vez que a indústria nacional, por restrições europeias, tem de implementar as MTD (European Commission, 2007). Ainda no Brasil, Condeixa et al. (2014) concluem que, para paredes internas de tijolo, a etapa de uso/manutenção é a responsável pela maioria dos impactes ambientais determinados (mais de 50% para a maioria das categorias), ao contrário do presente estudo e dos restantes estudos, justificando com a fraca qualidade da construção, o clima húmido do Rio de Janeiro, e ainda as questões culturais/moda (reformas na disposição dos quartos). No entanto, estes autores não apresentaram valores absolutos dos impactes, mas antes relativos.

O estudo de ACV de tijolos na Índia (Kumbhar et al., 2014) não permite comparações por as unidades e método de cálculo dos impactes ambientais serem distintos dos usados neste estudo. No entanto, atendendo ao tipo de combustível utilizado (carvão betuminoso e sub-betuminoso de baixa qualidade com baixo PCI) e aos dados de inventário reportados para as emissões (ex. partículas e SO<sub>2</sub>) muito superiores aos do presente estudo, é esperado que os impactes sejam superiores aos nacionais.

#### 4.1.3.4 Análise de sensibilidade

Neste subcapítulo efetua-se uma análise de sensibilidade para avaliar o efeito de escolhas metodológicas efetuadas, particularmente:

- a) Cenário de fim de vida (opção de reciclagem);
- b) Regras de alocação;
- c) Cenários de critérios de exclusão de entradas e saídas.

Nos itens seguintes cada um destes cenários de análise de sensibilidade é detalhado, utilizando o estudo de caso do tijolo cozido a gás natural, já que é a MTD do sector a nível europeu, e é utilizado em Portugal (apesar de na atualidade não ser o mais utilizado por razões económicas).

##### a) Fim de vida

Assim neste item, destaca-se uma análise de sensibilidade ao fim de vida por aplicação de uma opção de reciclagem na etapa de fim de vida (etapa C), que apesar de ser pouco relevante para grande parte das categorias de impacto em estudo, contribui para a promoção de estratégias de economia circular e simbioses industriais, onde um resíduo passa a recurso ou matéria-prima secundária num novo ciclo de vida. A modelação foi efetuada com base nas opções de reciclagem do tijolo e da argamassa disponibilizadas na base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014) (*“cenário default – Allocation at the point of substitution”*, segundo um modelo atribucional).

Na Tabela 16 ilustra-se a redução alcançada em termos percentuais por categoria de impacto para 3 situações distintas:

- i. apenas a operação de reciclagem face ao aterro (módulo C da ACV do tijolo);
- ii. reciclagem face à etapa C (fim de vida da parede de tijolo);
- iii. reciclagem em todo o ciclo de vida (berço ao túmulo).

Verifica-se que a opção de reciclagem do tijolo cerâmico face à deposição em aterro de “per si” reduz para mais de metade os impactos face à opção de aterro para grande parte das categorias, exceto partículas e a depleção da água cuja redução é pouco significativa ou aumenta mesmo, associado provavelmente às operações de redução de granulometria e outras necessárias à reciclagem. As reduções mais significativas neste cenário registam-se para a toxicidade humana não cancerígena, ecotoxicidade e uso do solo.

Tabela 16 – Percentagem de redução alcançada por unidade funcional (1 m<sup>2</sup>) para reciclagem do material cerâmico no fim de vida

Categoria de impacto - redução (%)	Fim de vida do tijolo - reciclagem	Etapas de fim de vida da parede (módulo C)	Berço ao túmulo
Aquecimento global (GWP)	66	29	1,7
Acidificação (AP)	57	29	2,9
Eutrofização (EP)	56	27	4,5
Oxidação fotoquímica (POCP)	60	27	2,6
Depleção da camada de ozono (ODP)	68	41	2,4
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	66	25	0,1
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	61	28	2,2
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	92	34	3,2
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	77	38	1,4
Matéria particulada (PM2.5)	8	-25	-11,3
Uso do solo (LU)	99	98	2,5
Depleção de recursos - água (WD)	-15	-19	-0,3
Ecotoxicidade (ET)	96	33	4,4
Acidificação (ILCD) (A+)	57	28	3,2
Formação de ozono fotoquímico (ILCD) (POCP +)	55	27	4,4

Já considerando toda a etapa de fim de vida (e seus processos), influenciada também pela argamassa utilizada para efetuar a parede, a redução é menos significativa para grande parte das categorias de impacto, sendo de destacar o aumento da emissão de partículas (PM2.5) e da depleção da água, associadas às operações de redução granulométrica (ex. moagens) necessárias à posterior reciclagem. Finalmente em termos de influência no impacto global, isto é considerando todas as etapas do ciclo de vida (última coluna da tabela), verifica-se que a opção de reciclagem é pouco expressiva, tal como seria de esperar face ao contributo diminuto desta etapa para todo o ciclo de vida. Destaca-se porém um aumento da emissão de partículas (PM2.5) associado à necessária redução granulométrica para a reciclagem e ao maior peso que a etapa de fim de vida representa para esta categoria.

**b) Regras de alocação**

As fábricas de tijolo em estudo são sistemas multifuncionais porque produzem outros tijolos com dimensões diferentes de 30x20x11 cm. Portanto, foi necessário alocar algumas das entradas e saídas para a dimensão do tijolo em estudo (por unidade funcional).

A ISO14040:2006 (ISO, 2006a), bem como a EN 15804+A1 (CEN,2013) afirmam que a alocação deve ser evitada, na medida do possível, e, quando não é possível evitá-la, deve respeitar o objetivo principal dos processos estudados, incluindo os produtos e funções relevantes, e deve basear-se em propriedades físicas (por exemplo, massa, volume) quando a diferença de receita geradas pelos co-produtos é baixa.

Neste estudo, foi adotado o procedimento de alocação default (Allocation at the point of substitution), segundo uma abordagem atribucional, em função da massa, unidade física considerada mais adequada, que consistiu em dividir as quantidades de entradas e saídas proporcionalmente à massa de tijolo para obter os fluxos de entradas e saídas individualizadas para o tijolo 30x20x11 cm.

Neste contexto, efetua-se agora uma análise de sensibilidade para avaliar os efeitos da utilização de uma alocação económica (em vez da mássica utilizada nos itens anteriores), podendo deste modo contribuir para fundamentar a tipologia de alocação a efetuar numa eventual RCP para esta categoria de materiais cerâmicos.

Na Tabela 17 constam os custos das diversas tipologias de tijolo fabricadas para duas áreas de distribuição (raio médio de 100 km e raio médio de 200 km, a primeira considerada média, e a segunda maximizante).

*Tabela 17 – Dados de massa e preço num raio de 100 e 200 km por tipologia de tijolo cerâmico*

<b>Formato (cm)</b>	<b>30x20x22</b>	<b>30x20x15</b>	<b>30x20x11</b>	<b>30x20x09</b>	<b>30x20x07</b>
Massa (kg)/un	8,4	6,0	4,5	4,2	3,5
Preço (€)/un - raio de 100 km	0,274	0,174	0,131	0,128	0,109
Preço (€)/un - raio de 200 km	0,309	0,197	0,148	0,145	0,123

No presente estudo, tal como no publicado com dados de 2008 (Almeida et al., 2015b), concluiu-se que os procedimentos de alocação mássica e económica originam resultados semelhantes para o tijolo em estudo, porque os fatores que influenciam o preço do tijolo estão relacionados com custos de produção (por exemplo, matérias-primas, auxiliares e energia) e, portanto, o preço de venda do formato de tijolo (dimensão do tijolo) é proporcional à massa (ver Tabela 17).

**c) Cenários de critérios de exclusão de entradas e saídas**

O objetivo do uso de critérios de exclusão (ou critérios de corte) é decidir quais processos podem ser excluídos das fronteiras do sistema sem alterações significativas nos resultados da ACV.

Por defeito, todos os processos na abordagem do "berço ao portão" foram contabilizados e, portanto, nenhum critério de exclusão foi aplicado. A fim de fornecer informações para o estabelecimento de RCP para tijolos cerâmicos, foi realizada uma análise de sensibilidade consistindo na análise do efeito de cenários com várias opções de critérios de exclusão:

- **Opção I** - Excluir processos que representem menos de 1% do consumo de energia primária renovável e não renovável e 1% da massa total de entrada de cada processo (unitário) de acordo com EN 15804+A1:2013;
- **Opção II** - Excluir as entradas e saídas que representam menos de 0,5% da massa do tijolo cerâmico (pronto para ser vendido);
- **Opção III** - Excluir as entradas e saídas que representam menos de 1% da massa do tijolo cerâmico (pronto para ser vendido).
- **Opção IV** - Excluir as entradas e saídas que representam menos de 5% da massa do tijolo cerâmico (pronto para ser vendido).

Deve-se notar que, para todas estas opções, as substâncias perigosas foram sempre incluídas (ex. óleos e lubrificantes considerados perigosos), independentemente dos critérios de exclusão utilizados. Para a realização desta análise de sensibilidade foram selecionados os dados de fabrico de tijolo fabricado com recurso ao gás natural, na abordagem do "berço ao portão", pois é a MTD para o sector cerâmico (e em particular para este subsector).

Na Tabela 18 consta a percentagem de redução alcançada para os impactes ambientais por unidade funcional (1 m<sup>2</sup>) para cada cenário de exclusão em estudo.

Os quatro cenários de critérios de exclusão para a abordagem do "berço ao portão" (opções I a IV) apresentam resultados menores que os impactes determinados sem exclusão, tal como esperado.

Os resultados obtidos na opção I utilizando os critérios de exclusão de acordo com a norma EN 15804+A1:2013 representam mais de 99% dos resultados obtidos para todas as categorias de impacto sem o critério de exclusão. Note-se que a aplicação deste critério assume o inventário prévio de todos os materiais e energia para os processos (logo não existe poupança de recursos na fase de inventário). Com este critério, foram excluídos alguns gases industriais (oxigénio, acetileno, propano) e componentes metálicos (por exemplo, moldes), óleos de lubrificação não perigosos, alguns materiais de embalagens (ex.

cinta plástica e metálica) e alguns resíduos. Este cenário apresenta as menores reduções de impactes para algumas categorias.

*Tabela 18 – Percentagem de redução alcançada por unidade funcional (1 m<sup>2</sup>) para cada cenário*

<b>Categoria de impacte - redução (%)</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>
Aquecimento global (GWP)	0,7	0,4	3,5	4,8
Acidificação (AP)	0,6	0,6	7,9	10,2
Eutrofização (EP)	0,5	0,8	16,6	20,1
Oxidação fotoquímica (POCP)	0,5	0,2	2,4	5,6
Depleção da camada de ozono (ODP)	0,5	0,4	4,0	5,0
Depleção de rec. abióticos – elementos (ADe)	1,0	0,2	1,1	24,6
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	0,8	0,3	3,8	5,4
Toxicidade humana, efeito não- cancerígeno (HTnc)	0,4	0,2	0,8	4,8
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	0,2	0,1	1,7	15,7
Matéria particulada (PM2.5)	0,5	1,0	10,6	16,9
Uso do solo (LU)	0,0	0,0	0,1	52,8
Depleção de recursos - água (WD)	0,6	0,6	1,6	3,5
Ecotoxicidade (ET)	0,6	0,6	1,2	5,6
Acidificação (ILCD) (A+)	0,2	0,9	9,0	11,3
Formação de ozono fotoquímico (ILCD) (POCP +)	0,2	1,4	13,7	16,3

Quanto aos cenários correspondentes às opções II, III e IV, que refletem critérios de 0,5%, 1% e 5% respetivamente da massa do tijolo cerâmico (pronto para venda) verifica-se que a fase de inventário pode ser mais facilitada em termos de tempo despendido e de complexidade, uma vez que apenas é necessário recolher dados dos materiais/energia consumidos ou gerados acima desses limiares, exceto se existirem substâncias perigosas. A aplicação da opção II e da opção III ocasionou a inclusão semelhante de entradas e saídas, com exceção de materiais utilizados na etapa de embalagem e gásóleo (excluído na opção III) e alguns resíduos. Os critérios de exclusão parecem ser insignificantes (menos de 1%) para a opção II, obtendo-se mesmo para grande parte das categorias os menores valores, o que aliado à poupança de recursos torna esta metodologia muito atrativa.

Já para o cenário da opção III apenas para a depleção abiótica de elementos, toxicidade humana não cancerígena, uso do solo e ecotoxicidade os critérios são insignificantes, enquanto se verificam reduções significativas nomeadamente para as categorias de acidificação (8 a 9%), eutrofização (17%), partículas (PM2.5) (11%) e oxidação fotoquímica (ILCD) (14%), o que poderá comprometer o uso deste critério.

A opção IV apresenta as maiores reduções, pois reflete um critério de 5% da massa do tijolo cerâmico (pronto para venda), sendo que neste cenário nenhum material de embalagem é incluído, nem mesmo as paletes de madeira, pelo que as reduções de impacto são muito significativas para o uso do solo (LU) (53%), depleção abiótica elementos (25%), eutrofização (20%), e toxicidade cancerígena e PM2.5 (16 e 17% respetivamente) justificado pela ausência de impactos das paletes de madeira. Neste contexto, este critério de exclusão (IV) não se afigura razoável de aplicar face às reduções significativas de impactos que poderá ocasionar em determinadas categorias.

#### 4.1.3.5 Potenciais medidas de melhoria do impacto ambiental

Conforme se pode constatar nos itens anteriores, um dos principais pontos críticos detetados foi a cozedura do tijolo cerâmico dentro do módulo de produção. Nos estudos de caso acima explanados foi já abordada a questão do uso de diferentes combustíveis durante o processo de cozedura, incluindo o gás natural que é a MTD do sector e suas consequências no desempenho nas categorias de impacto ambiental em estudo.

Assim, para além da substituição por outros combustíveis, serão estudadas mais duas medidas de melhoria de acordo com o documento de referência BREF da cerâmica (European Commission, 2007), nomeadamente:

- a) **M1** - introdução de queimadores de alta velocidade para a combustão do gás natural (medida 5.1.2, alínea a), subalínea I do BREF CER), que promovem uma melhor homogeneização, eficiência e uma redução de consumos de energia estimada em 10% e consequentes emissões de combustão (CO<sub>2</sub>, CO, COVNM, SOx e NOx). Com investimento de 45 mil euros e um payback estimado de 2 a 2,5 anos;
- b) **M2** – melhoria do isolamento do forno e das condutas do sistema de recuperação de calor com uma redução de consumos de energia estimada em 6% e nas consequentes emissões de combustão (CO<sub>2</sub>, CO, COVNM, SOx e NOx). Com investimento de 50 mil euros e um payback estimado de 2,5 anos a 3 anos;
- c) **M3** - melhoria do sistema de iluminação, com o objetivo de reduzir o consumo de eletricidade em 10%, através da substituição dos sistemas de iluminação na fábrica por outros mais eficientes (ex. LED), com um investimento aproximado de 7500 euros correspondente a um payback de 1 ano e 9 meses (Serrano et al., 2009);
- d) **M4** – conjugação de todas as medidas anteriores de M1 a M3.

Estas medidas serão estudadas para a fábrica alimentada a gás natural (MTD do sector) e na abordagem do berço ao portão (A1-A3), por ser a etapa mais relevante para a maioria das categorias de impacto.



A Tabela 19 apresenta a redução obtida (expressa em %) para cada categoria de impacto ambiental em relação ao desempenho inicial para cada uma das medidas de melhoria sugeridas.

*Tabela 19 – Percentagem de redução alcançada por 1 m<sup>2</sup> de parede de tijolo cerâmico*

<b>Categoria de impacto - redução (%)</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>
Aquecimento global (GWP)	7,3	4,4	1,3	12,3
Acidificação (AP)	4,7	2,8	2,8	9,9
Eutrofização (EP)	2,7	1,6	2,0	6,0
Oxidação fotoquímica (POCP)	7,6	4,6	1,3	12,7
Depleção da camada de ozono (ODP)	8,0	4,8	0,5	12,4
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	0,0	0,0	7,8	7,9
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	7,6	4,6	1,0	12,4
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	3,1	1,8	3,6	8,2
Toxicidade humana, efeito não- cancerígeno (HTnc)	2,5	1,5	1,5	5,2
Matéria particulada (PM2.5)	3,6	2,9	1,3	6,5
Uso do solo (LU)	0,0	0,0	1,0	1,1
Depleção de recursos - água (WD)	0,1	0,1	8,0	8,2
Ecotoxicidade (ET)	2,1	1,3	0,9	4,2
Acidificação (ILCD) (A+)	4,5	2,7	2,6	9,4
Formação de ozono fotoquímico (ILCD) (POCP +)	4,7	2,8	1,1	8,1

Da análise da Tabela 19 verifica-se que a medida a M1, referente à substituição de queimadores por outros de alta eficiência e alta velocidade, é a mais eficaz para a redução dos impactos ambientais da maioria das categorias, com a exceção da depleção de recursos abióticos elementos, toxicidade cancerígena, uso do solo, da depleção da água, onde M3 (relacionada com a produção da eletricidade) é mais eficaz. Tal como seria de esperar M4 é a mais eficiente pois conjuga todas as medidas anteriores, sendo de destacar a sua eficiência para o aquecimento global, acidificação, oxidação fotoquímica, depleção da camada de ozono e depleção de recursos fósseis, com reduções superiores a 10%.

#### 4.1.4 Conclusão

Da análise do trabalho de ACV desenvolvido para o tijolo cerâmico, conclui-se que:

- o uso de diferentes combustíveis no fabrico de tijolo cerâmico acarreta impactes ambientais distintos;
- os menores impactes ambientais são atingidos quando se utiliza o gás natural (maioria) ou a biomassa (depleção de recursos fósseis, aquecimento global e a depleção da camada de ozono), confirmando o gás natural como a MTD do sector;
- a etapa do berço ao portão é a mais significativa para todas as categorias de impacto exceto para a depleção abiótica de elementos e ecotoxicidade, onde a etapa de construção e a de transporte do produto final assumem a posição mais relevante, respetivamente. A etapa de construção representa para a grande maioria das categorias a segunda etapa mais relevante, e a etapa de transporte assume a terceira posição. As restantes etapas de uso e fim de vida são insignificantes para a maioria das categorias, exceto partículas (PM2.5) no fim de vida;
- a “produção de embalagem” é o processo dominante para o uso do solo nos casos de utilização de gás natural e coque, devido ao contributo das paletes de madeira e plástico. Já a “produção de combustíveis” é o maior contribuinte para a depleção da camada de ozono, depleção de recursos fósseis, para as partículas (PM2.5) e uso do solo (cenários com biomassa), toxicidade (cenários com biomassa). A “produção da eletricidade” é o processo dominante para a depleção de recursos elementos e depleção da água. As “atividades na fábrica” são das que mais variam em função da tipologia de combustível, contribuindo maioritariamente para o aquecimento global, oxidação fotoquímica (CML-IA), partículas PM2.5 (exceto uso de apenas biomassa), e ainda para a acidificação (apenas com o uso do coque). Finalmente, o “transporte” é o processo dominante para a ecotoxicidade;
- os critérios de exclusão da norma EN 15804 são adequados para aplicação ao estudo de caso, apesar de não existirem vantagens em termos de recolha de dados de inventário. Já o critério de 0,5% da massa do tijolo cerâmico pronto a ser vendido também se revelou ser adequado, com uma redução significativa no esforço de recolha de dados, enquanto os critérios de 1% e 5% são inadequados;
- a adoção de diferentes procedimentos de alocação (massa e valor económico) conduziu a resultados semelhantes uma vez que o preço final de mercado de várias dimensões do tijolo é proporcional à sua massa;
- a opção de reciclagem no fim de vida das paredes de tijolos conduz a reduções pouco significativas para a maioria dos impactes, uma vez que a etapa de fim de vida é pouco expressiva face às restantes etapas do ciclo de vida;

- as infraestruturas têm pouca relevância para a maioria das categorias de impacto exceto para a depleção de recursos abióticos, uso do solo, toxicidade humana e ecotoxicidade, onde assumem uma importância significativa. Este facto pode ser relevante nas DAPs que excluem infraestruturas;
- finalmente o desempenho do tijolo de 2008 para 2016 piorou na maioria das categorias de impacto, para as empresas a gás e a biomassa, face aos efeitos da crise que tem conduzido a menores taxas de utilização, menor otimização de cargas e ao não investimento em novos equipamentos.

## **4.2 Telha cerâmica**

Neste item pretende-se desenvolver estudos de caso de ACV com a telha cerâmica produzida em Portugal, material muito utilizado a nível nacional na cobertura de telhados.

### **4.2.1 Descrição do produto**

A telha cerâmica é um produto cerâmico para colocação descontínua sobre telhados inclinados, que é fabricada por conformação (extrusão e/ou prensagem), secagem e cozedura da argila preparada, com ou sem aditivos (def. 3.3.1 da norma NP EN 1304 (IPQ, 2015)).

### **4.2.2 Metodologia de ACV aplicada à telha cerâmica**

A metodologia de ACV seguiu também a ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 (ISO, 2006a, 2006b). A abordagem seguida foi do “berço ao túmulo”, com etapas modulares baseadas na EN15804+A1:2013 (CEN, 2013).

#### **4.2.2.1 Definição de objetivo e âmbito**

O objetivo é identificar e avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da telha cerâmica produzida em Portugal (telha Lusa). Foram considerados dois estudos de caso ao longo do tempo (desde 2005/2006 até 2014) representativos de duas tecnologias de fabrico e enfora de telha cerâmica nacionais:

- a) sem a mobília refratária e com recurso a arame, considerada mais tradicional – Telha T1;
- b) utilização de mobília refratária (gazete), considerada mais evoluída – Telha T2.

Estes estudos de caso são representativos da telha cerâmica produzida em Portugal, e também a nível europeu e mundial, em termos de capacidade instalada, tipo de cozedura (forno túnel), dimensões do forno e tecnologia usada na conformação (técnica de extrusão seguida por prensagem). Quanto ao combustível usado, o gás natural é o único combustível utilizado em Portugal neste subsector, embora a nível mundial este seja também o principal combustível usado poderão existir outros mais residuais como sejam o gás de petróleo liquefeito (GPL) ou mesmo o fuelóleo e a biomassa.

Este estudo pretende ainda:

- a) compreender se as opções tecnológicas de enfora (com e sem mobília refratária) têm influência nos impactos ambientais;
- b) verificar a evolução de impactos, desde 2005/2006 (antes da crise económica) até 2014, sem se terem introduzido alterações de fundo no processo de fabrico.

Aferindo simultaneamente a coerência de períodos de referência de 5 anos de validade de DAP mencionados na EN15804+A1:2013;

- c) determinar impactes ambientais, para além dos mencionados na norma EN 15804+A1 (CEN, 2013), que possam transparecer o seu desempenho ambiental;
- d) verificar a influência dos métodos de AICV (CML-IA e ILCD) nas categorias de impacto de acidificação e oxidação fotoquímica nos resultados obtidos;
- e) perceber a influência que as infraestruturas (construção de edifícios fabris, maquinaria, equipamentos, etc.) poderão ter nos resultados dos impactes ambientais na abordagem do berço ao portão;
- f) relacionar os resultados por unidade funcional ( $m^2$ ) e por unidade declarada (kg) verificando a influência da espessura do material nos resultados.

### 4.2.2.2 Unidade funcional

A unidade funcional definida é 1  $m^2$  de telha cerâmica Lusa vermelha produzida em Portugal, para revestir o telhado exterior num período de 50 anos. A principal função da cobertura do telhado é proteger o interior do edifício de eventos climáticos (precipitação, vento, neve, etc.), ajudando a manter o isolamento térmico.

No caso de T1 o peso médio é de 3,4 kg/peça enquanto para T2 é de 3,8 kg/peça, sendo necessárias 12 peças por  $m^2$  em ambos os casos.

### 4.2.2.3 Fronteiras do sistema

As fronteiras do sistema foram definidas tendo por base o modelo de etapas e módulos estabelecido na EN 15804+A1 (CEN, 2013) e incluem:

- A1 - extração e processamento de matérias-primas, bem como o fornecimento de auxiliares;
- A2 - transporte de matérias-primas e auxiliares;
- A3 - produção de telha cerâmica na fábrica;
- A4 - distribuição da telha cerâmica;
- A5 - processo de instalação da telha cerâmica;
- B - uso/utilização da telha cerâmica que inclui sempre que aplicável a utilização (lavagem com água), manutenção, reparação, substituição e reabilitação;

- C - fim de vida da telha cerâmica (inclui a desconstrução e demolição, transporte, processamento dos resíduos e eliminação final).

A produção e manutenção de bens de capital, tais como edifícios, maquinaria, equipamentos, etc., foram excluídas das fronteiras do sistema. Porém, e como análise de sensibilidade na etapa do berço ao portão (A1 a A3), efetua-se a estimativa do impacto destas infraestruturas, considerando os dados de inventário contidos na base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).

Assim, são avaliadas todas as etapas do ciclo de vida, ou seja, segue-se uma abordagem do berço ao túmulo (“cradle-to-grave”), conforme Figura 43.

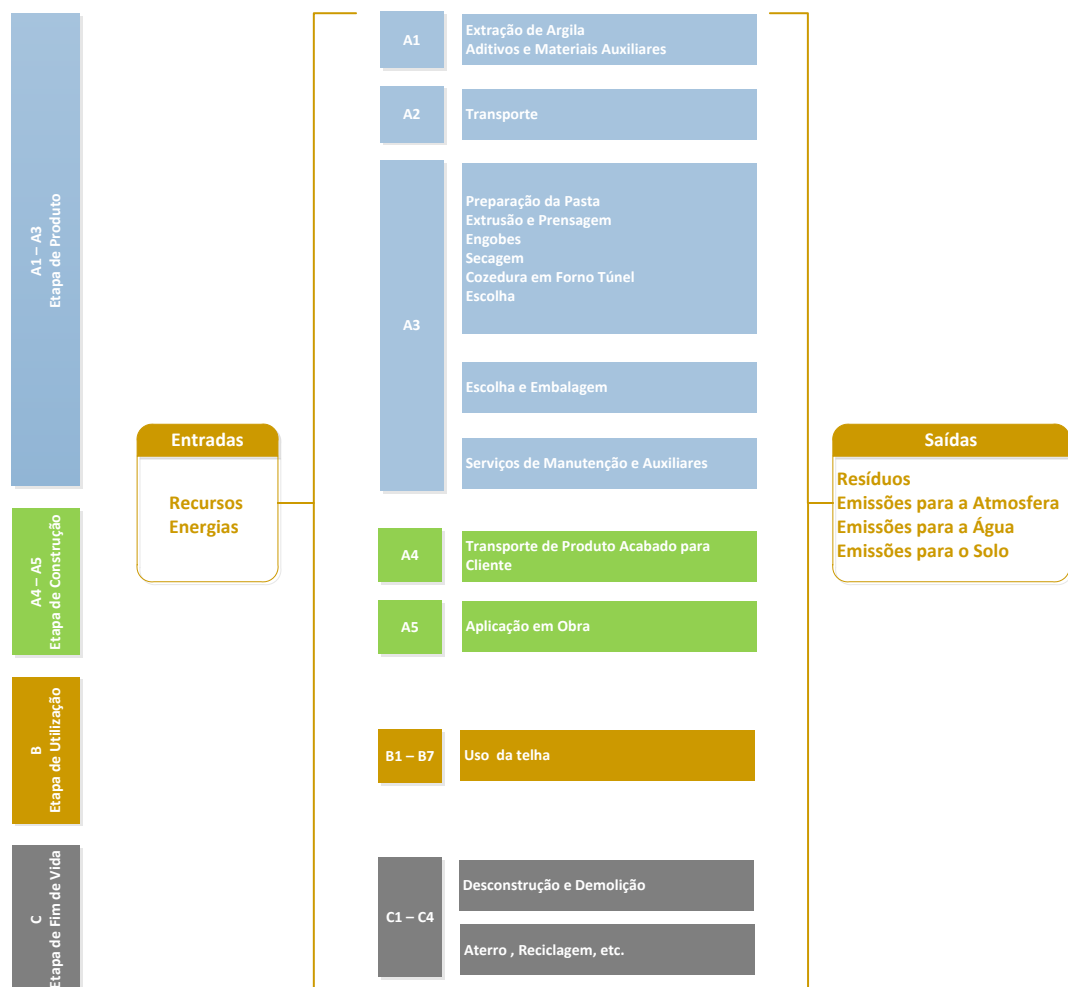


Figura 43 – Fronteiras do sistema da telha cerâmica

De seguida apresenta-se uma descrição mais detalhada das fronteiras do sistema.

O módulo A1 inclui a extração e processamento de recursos naturais como argilas e areias em pedreiras, e a aquisição (após extração e processamento) de materiais auxiliares como corantes (tintas), vidros e engobes para a fase de decoração do material (inexistente para T1 e residual para T2 face ao produto ser maioritariamente sem vidrados ou engobes). Inclui ainda a produção de arame (para T1) e refratário (para T2).

De mencionar que os recursos geológicos são extraídos mecanicamente de acordo com o plano de pedreira, que inclui o plano de lavra e o plano ambiental e de recuperação paisagística, podendo, posteriormente, sofrer operações de lavagem, crivagem, loteamento e, seguidamente são enviados para as unidades industriais. No fabrico de telhas, os barreiros estão normalmente próximos (raio inferior a 50 -100 km).

Os vidros cerâmicos e engobes são utilizados apenas em T2 nos últimos anos. Estes são formados por composições que integram parcialmente alguns dos materiais como fritas, óxidos metálicos, agentes de dispersão e de coloração e são fabricados por empresas especializadas, que os fornecem em pó ou em papa.

Este módulo inclui ainda a produção de eletricidade a partir das fontes nacionais (mix elétrico português de 2005 a 2014) incluindo a sua extração, processamento e distribuição. Assim como a produção de combustível (gás natural).

O módulo A2 refere-se ao transporte das matérias-primas e auxiliares para a unidade fabril, tendo-se assumido uma média de 50 km para T1 e 80 km para T2, em função dos elementos disponibilizados pelos fabricantes.

O módulo de produção (A3) inclui vários processos unitários:

- pré-preparação e preparação de matérias-primas - processamento das diversas matérias-primas de forma a uniformizar as suas características. Estas operações incluem o doseamento, destorroamento, laminagem e mistura, sendo posteriormente colocadas em tulhas, onde permanecem em maturação algum tempo (cerca de um mês), a fim de melhorar/uniformizar as suas características. Este processo pode ser realizado numa fábrica exterior dedicada exclusivamente à preparação de pastas como é o caso de pastas de especialidade, não sendo porém muito vulgar neste subsector, nem nos estudos de caso;
- conformação – é efetuada sequencialmente por extrusão da pasta em fieiras de vácuo, corte de lastras e sua prensagem automática. Normalmente são usados moldes metálicos revestidos a borracha (T1). Noutros casos são usados moldes de gesso para dar melhor acabamento superficial aos produtos (T2). As peças, após conformação, são automaticamente carregadas nos secadores para o processo subsequente de secagem;

- secagem - remoção de humidade da telha cerâmica, em secadores do tipo contínuo, semi-contínuo ou estáticos (alimentados com ar quente ambiente recuperado da zona de arrefecimento do forno podendo ser complementados com um queimador a gás natural no período de Inverno). Os ciclos de secagem têm uma duração compreendida entre 12 a 28 horas, consoante o tipo de material, atingindo uma temperatura máxima de secagem de cerca de 80 °C. A finalidade é obter um produto seco preparado para ser cozido;
- decoração – depois de seca, a telha pode ou não passar por uma linha de engobagem ou vidragem, onde são aplicados diversos tipos de vidro para obter efeitos decorativos no produto final. No caso de T1 não é aplicada qualquer tipo de decoração. Já a T2 possui linhas de vidragem, hidrofugação e engobagem mas apenas uma percentagem reduzida da telha (cerca de 10%) sofre esta operação. A decoração pode ser aplicada por diversas tipologias de equipamentos como campânulas ou cabines de vidrar, ou ser manual por imersão;
- cozedura – consiste na sujeição das telhas cerâmicas a elevadas temperaturas (850-950°C) de forma a obterem as suas características técnicas finais (ex. cor, resistência, porosidade) em fornos túnel, alimentados a gás natural, onde os vagões com as telhas avançam sobre carris na direção oposta à circulação do ar, encontrando-se as fontes de calor em posições fixas. O processo de cozedura, maior consumidor de energia, pode decorrer em suporte refratário (gazetes) (caso da T2) ou a telha pode ser simplesmente aramada (caso da T1). A utilização de mobília refratária evita empenos das telhas;
- embalagem – as telhas são seguidamente sujeitas a operações de escolha, embalagem e armazenamento. A embalagem é feita com filme plástico e/ou cinta e/ou uniões metálicas, sob paletes de madeira. No caso de T2 verifica-se ainda que recorre a cartão como separador entre as várias camadas de telhas.

Este módulo de produção (A3) inclui ainda as operações de manutenção desenvolvidas na fábrica, bem como sistemas de tratamento de águas residuais e sistemas de tratamento de efluentes gasosos dos fornos apenas para T2 (sistemas de adsorção em leitos de brita calcária para precipitar os ácidos fluorídrico e clorídrico presentes nas emissões gasosas, bem como de forma residual o dióxido de enxofre). De mencionar que a fábrica onde se produz T1 não dispõe de qualquer tipo de sistema de tratamento de efluentes gasosos do forno. Ambas as instalações dispõem de sistemas de despoeiramento com filtros de manga para as operações de receção e/ou preparação de matérias-primas e conformação.



Na Figura 44 encontra-se um fluxograma de produção da telha cerâmica em fábrica, com indicação qualitativa dos principais aspetos ambientais.

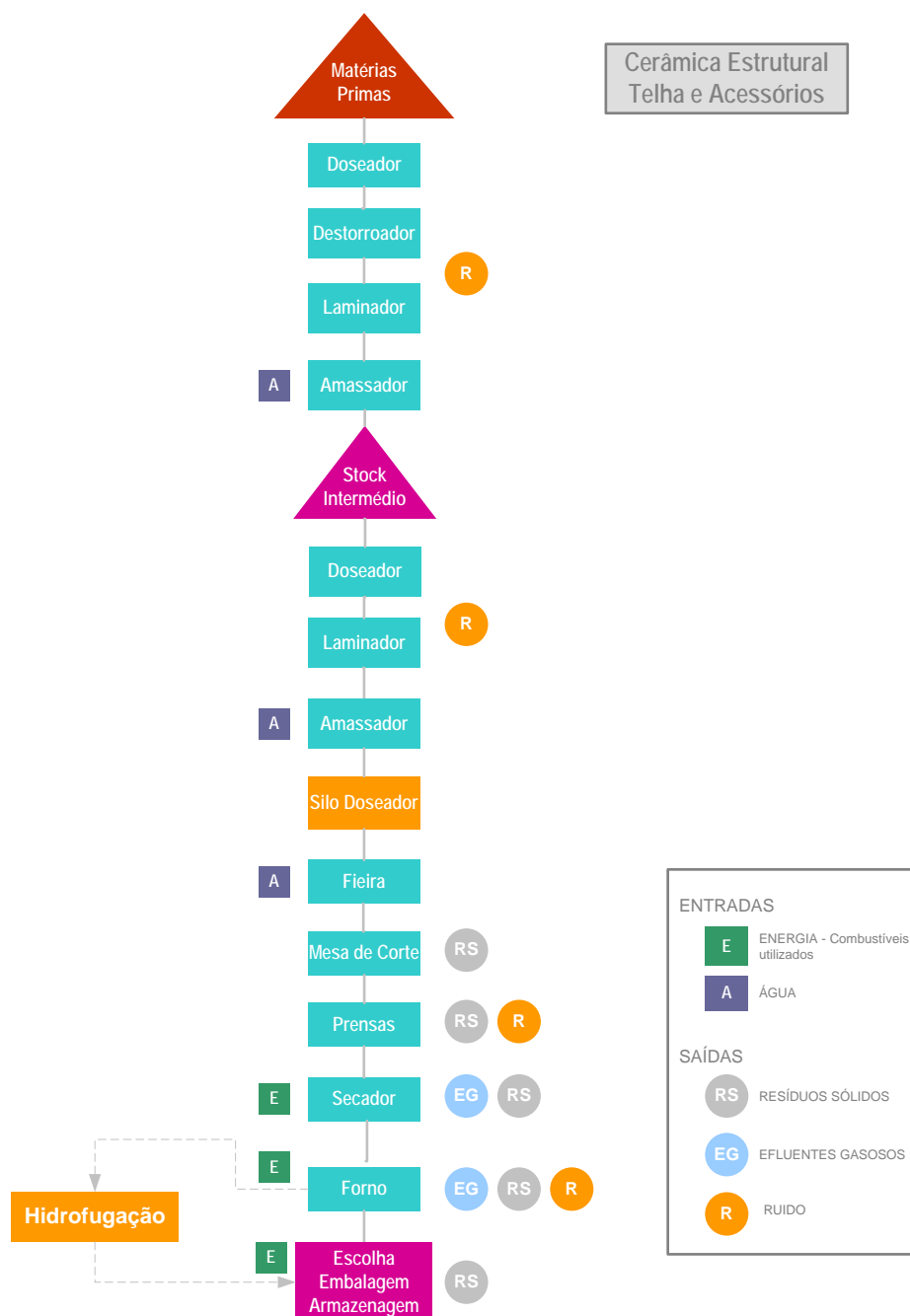


Figura 44 – Fluxograma de fabrico da telha cerâmica com identificação de principais aspetos ambientais

A etapa de produto (A1-A3) inclui ainda a produção da embalagem (filme plástico e/ou cinta plástica e/ou uniões metálicas e paletes de madeira), a produção de eletricidade a partir das fontes nacionais (mix elétrico português de 2005 a 2014) e a produção de combustíveis (gás natural e gasóleo). De mencionar que o gás natural, único combustível usado nos processos térmicos de fabrico, é a melhor técnica disponível (MTD) de acordo com o documento de referência para este subsector da indústria cerâmica (European

Commission, 2007). Já o gásóleo é usado em alguns transportes no interior da fábrica e nos geradores de emergência (em caso de falha de energia elétrica), representando uma pequena parte do consumo global de energia (1 a 2%) face ao consumo de gás natural que representa 98 a 99%.

O módulo A4 inclui o transporte das telhas cerâmicas para os centros de distribuição e o respetivo transporte para o local de construção (obra). Neste caso, foi aplicado um cenário de transporte por estrada em camião para a distância total de 300 km, considerando uma distância média para Portugal (num cenário considerado maximizante face à localização das principais unidades fabris). Já o módulo A5 inclui a instalação de telhas cerâmicas no edifício, num cenário de aplicação de telhas manual, sem recurso a nenhum material auxiliar ligante, referindo-se que a argamassa ficou fora do âmbito desta ACV (a quantidade é residual). Foram consideradas perdas em obra que se estimaram em 1%.

O armazenamento das telhas em obra não requer condições especiais adicionais uma vez que se trata de um material inerte (não reativo), não gera odores nem outra tipologia de emissões para o ambiente. Durante a atividade de aplicação em obra podem ainda ser produzidos resíduos associados a materiais de embalagem (filme plástico e/ou cinta plástica e/ou uniões metálicas e paletes de madeira). Neste estudo foi considerado que os resíduos foram encaminhados para operadores licenciados, para valorização (reciclagem), de acordo com o MIRR.

A etapa B inclui a utilização da telha cerâmica após a sua instalação e as operações de limpeza / manutenção. Esta é uma operação simples, que consiste na limpeza de detritos vegetais e poeiras, e na substituição (reparação) das telhas danificadas. Esta operação pode ser planificada em função da envolvente local, nomeadamente pela existência de árvores, fungos, proximidade marítima, etc. Considerou-se uma taxa de substituição de telhas de 2% nos 50 anos.

A etapa C refere-se ao fim de vida da telha cerâmica, com destaque para os resíduos de demolição e construção gerados, e para a energia despendida nas operações de demolição. Esta tipologia de resíduos pode ser reutilizada em obra, para efetuar fundações ou outras utilizações, embora no presente estudo o cenário utilizado tenha sido a deposição em aterro (“pior cenário”).

#### **4.2.2.4 Inventário do ciclo de vida**

Os dados associados à extração (A1), transporte para a unidade de produção (A2) e à produção de telha (A3), foram recolhidos junto dos fabricantes e referem-se a dados produtivos (ex. consumos de materiais e energia, dados de produção) e dados de desempenho ambiental (ex: medições de efluentes, consumos energéticos, dados de geração de resíduos), representativos dos anos de 2006 até 2014 (e ainda 2005 apenas para a T2). Recorreu-se aos dados da base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014) para os

restantes processos unitários. As fontes de informação utilizadas na recolha de dados de inventário para as telhas cerâmicas selecionadas estão resumidas na Tabela 20.

*Tabela 20 – Fontes de dados utilizados para a fase de ICV da telha*

<b>Etapas</b>	<b>Módulo</b>	<b>Descrição de dados</b>	<b>Fonte de dados:</b>
Extração de matérias primas	A1	Entradas e saídas	Indústria extrativa portuguesa Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).
Processamento de materiais auxiliares	A1	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).
Transporte de materiais para a fábrica de telha	A2	Distância, modo de transporte, tipo de combustível	Indústria extrativa portuguesa e fábricas de telha T1 e T2 para quantificar a carga, energia requerida, modo de transporte e tipo de combustível. Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014) para os fatores de emissão.
Fábrica de telha	A3	Entradas e saídas	Fábricas de telha T1 e T2. Consulta de faturas, contadores, registos, boletins de análise de parâmetros ambientais, PRTR, MIRR.
Transporte para o local de construção	A4	Distância, modo de transporte, tipo de combustível	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014)
Produção da eletricidade de 2005 a 2014	A1, A3, A5	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014) adaptada para o mix nacional desde 2005 até 2014 segundo dados oficiais (IEA, 2016)
Produção de combustível	A1 a A4. C1-C4.	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014), adaptada ao mix nacional no caso do gás natural (DGEG, 2017).
Fim de vida (desconstrução)	C1	Entradas e saídas, incluindo o gásóleo consumido para a desconstrução	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014)

A validação de dados dos fabricantes foi um processo moroso, iterativo e incluiu confirmações de dados entre os vários anos, balanços de massa e a comparação com fatores de emissão disponibilizados no documento de referência BREF CER (European Commission, 2007). Os dados de inventário para a etapa produto (A1-A3) de 1 m<sup>2</sup> de telha cerâmica constam da Tabela 21 e Tabela 22 para T1, e da Tabela 23 e Tabela 24 para T2. As saídas incluem materiais/produtos, energia, emissões atmosféricas, resíduos e emissões líquidas (neste caso apenas o efluente doméstico já que não ocorrem efluentes líquidos de cariz industrial nos processos de fabrico de telha não vidrada, e na vidrada são tratados como resíduos e são 100% incorporados na pasta cerâmica).

Foi aplicada uma regra de corte de 0,5% (em massa de produto) aos fluxos de entrada e saída, exceto quando se utilizam substâncias perigosas ou essenciais à interpretação (ex. arame, refratário).

Tabela 21 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m<sup>2</sup> de telha T1 (entradas)

Entradas	Unidades	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Argila	kg	4,41E+01	4,38E+01	4,37E+01	4,38E+01	4,39E+01	4,46E+01	4,41E+01	4,24E+01	4,46E+01
Areia	kg	--	--	1,12E-01	4,28E-01	1,07E+00	1,41E+00	3,04E+00	3,10E+00	2,95E+00
Carbonato de cálcio	kg	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Dolomite	kg	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Corantes e engobes	kg	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Arame	kg	7,63E-03	7,47E-03	6,94E-03	6,53E-03	6,50E-03	8,25E-03	6,81E-03	7,72E-03	6,93E-03
Óleo de lubrificação	l	3,39E-03	3,02E-03	3,30E-03	3,47E-03	4,18E-03	4,23E-03	4,02E-03	4,22E-03	4,32E-03
Água de furo	l	6,36E+00	6,12E+00	5,92E+00	5,71E+00	3,63E+00	6,36E+00	4,53E+00	3,22E+00	3,71E+00
Água rede pública	l	1,40E+00	1,31E+00	7,10E-01	6,06E-01	9,22E-01	1,00E+00	9,54E-01	1,14E+00	1,23E+00
Eleticidade	kWh	3,26E+00	3,18E+00	3,14E+00	2,89E+00	2,68E+00	2,70E+00	2,76E+00	2,76E+00	2,79E+00
Gás natural	GJ	1,11E-01	1,09E-01	1,21E-01	1,19E-01	1,07E-01	1,05E-01	1,03E-01	1,01E-01	1,02E-01
Gasóleo	MJ	2,34E+00	2,31E+00	2,47E+00	2,53E+00	2,43E+00	2,56E+00	1,64E+00	1,96E+00	1,84E+00
<i>Material de embalagem</i>										
• Madeira	Número	4,10E-02	3,86E-02	3,62E-02	3,08E-02	3,30E-02	3,09E-02	2,92E-02	2,74E-02	2,63E-02
• Filme plástico	kg	2,90E-02	2,78E-02	2,66E-02	2,44E-02	2,20E-02	2,58E-02	2,28E-02	2,11E-02	2,29E-02
• Cinta	kg	2,90E-03	2,90E-03	2,90E-03	2,08E-03	1,93E-03	1,79E-03	1,74E-03	1,69E-03	1,64E-03
• Metálica	kg	7,73E-04	7,73E-04	7,24E-04	7,24E-04	4,83E-04	4,83E-04	4,83E-04	4,59E-04	4,35E-04
Transportes de matérias-primas: camião 25 ton	tkm	2,21E+00	2,19E+00	2,18E+00	2,19E+00	2,20E+00	2,23E+00	2,20E+00	2,12E+00	2,23E+00

--não aplicável

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela 22 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m<sup>2</sup> de telha T1 (saídas)

Saídas	Unidades	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<i>Emissões para o ar</i>										
PM<10	kg	9,34E-03	8,58E-03	8,48E-03	9,12E-03	7,55E-03	6,76E-04	6,00E-04	6,49E-04	3,61E-04
PM>10	kg	1,83E-03	2,15E-03	2,12E-03	2,28E-03	1,88E-03	1,19E-04	1,50E-04	1,62E-04	9,02E-05
CO <sub>2</sub>	kg	6,66E+00	6,61E+00	6,98E+00	6,83E+00	6,28E+00	5,87E+00	5,67E+00	5,50E+00	5,68E+00
HF	kg	2,93E-04	2,92E-04	2,19E-03	2,49E-03	3,17E-03	5,80E-04	3,11E-04	6,14E-04	4,94E-04
HCl	kg	5,63E-05	5,64E-05	6,87E-04	3,80E-03	4,27E-03	2,80E-04	1,39E-04	1,70E-04	5,33E-05
CO	kg	7,02E-03	7,01E-03	1,09E-02	2,55E-02	2,17E-02	9,11E-03	2,56E-03	2,96E-03	2,28E-03
NO <sub>x</sub>	kg	1,06E-02	1,11E-02	1,05E-02	5,82E-03	5,74E-03	5,67E-03	5,73E-03	6,12E-03	5,79E-03
COVNM	kg	1,43E-03	1,10E-03	1,10E-03	1,70E-03	1,60E-03	1,64E-03	1,47E-03	1,33E-03	1,29E-03
SO <sub>x</sub>	kg	1,37E-02	1,38E-02	1,37E-02	1,40E-02	9,15E-03	1,08E-02	9,46E-03	1,38E-02	1,50E-02
As	kg	6,32E-08	6,34E-08	6,32E-08	6,46E-08	6,07E-08	5,58E-08	6,32E-08	6,32E-08	6,94E-08
Cd	kg	2,94E-07	3,06E-07	3,06E-07	3,13E-07	2,94E-07	2,70E-07	3,06E-07	3,06E-07	3,36E-07
Cr	kg	1,08E-06	1,04E-06	1,04E-06	1,06E-06	9,98E-07	9,19E-07	1,04E-06	1,04E-06	1,14E-06
Cu	kg	3,90E-08	3,86E-08	3,42E-08	2,02E-08	2,80E-08	2,00E-08	1,99E-08	1,86E-08	2,54E-08
Hg	kg	1,53E-07	1,55E-07	1,53E-07	1,56E-07	1,47E-07	1,35E-07	1,53E-07	1,53E-07	1,68E-07
Ni	kg	1,51E-06	1,47E-06	1,47E-06	1,50E-06	1,41E-06	1,30E-06	1,47E-06	1,47E-06	1,61E-06
Pb	kg	3,10E-06	3,06E-06	3,06E-06	3,13E-06	2,94E-06	2,70E-06	3,06E-06	3,06E-06	3,36E-06
Zn	kg	1,35E-06	1,32E-06	1,17E-06	6,90E-07	9,55E-07	6,79E-07	6,79E-07	6,34E-07	8,68E-07
<i>Emissões para a água:</i>		-- águas residuais encaminhadas para o saneamento camarário (sem qualquer tratamento)								
Resíduos totais produzidos	kg	2,42E-01	2,39E-01	2,41E-01	2,44E-01	2,40E-01	2,28E-01	2,14E-01	2,04E-01	1,93E-01
Resíduos valorizados	kg	1,22E-01	1,20E-01	1,21E-01	1,23E-01	1,65E-01	1,67E-01	1,71E-01	1,71E-01	1,63E-01
Resíduos não valorizados	kg	1,20E-01	1,19E-01	1,20E-01	1,21E-01	7,47E-02	6,06E-02	4,29E-02	3,22E-02	3,02E-02
Resíduos perigosos	kg	1,29E-03	1,27E-03	1,28E-03	1,30E-03	1,18E-03	1,12E-03	1,10E-03	1,14E-03	1,06E-03

Tabela 23 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m<sup>2</sup> de telha T2 (entradas)

Entradas	Unidades	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Argila	kg	4,73E+01	5,05E+01	4,73E+01	4,73E+01	4,74E+01	4,73E+01	4,98E+01	4,98E+01	5,06E+01	4,93E+01
Areia	kg	9,29E-01	1,04E+00	9,47E-01	9,71E-01	9,65E-01	1,06E+00	1,06E+00	1,11E+00	1,02E+00	9,80E-01
Carbonato de cálcio	kg	4,49E-02	5,28E-02	4,13E-02	3,41E-02	3,47E-02	3,15E-02	4,31E-02	5,24E-02	4,35E-02	4,83E-02
Dolomite	kg	--	--	--	7,21E-02	4,33E-02	4,56E-02	2,56E-02	2,74E-02	--	2,31E-02
Gesso	kg	1,62E-01	1,64E-01	1,62E-01	1,64E-01	1,62E-01	1,55E-01	1,57E-01	1,60E-01	1,55E-01	9,84E-02
Corantes e engobes	kg	--	--	--	--	--	--	--	--	6,06E-04	6,06E-04
Arame	kg	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Óleo de lubrificação	l	4,33E-03	4,29E-03	4,15E-03	3,88E-03	3,74E-03	3,42E-03	3,56E-03	3,88E-03	3,74E-03	2,83E-03
Água de furo	l	4,13E+00	4,64E+00	4,21E+00	4,32E+00	4,50E+00	1,30E+01	1,13E+01	1,30E+01	1,23E+01	1,09E+01
Água rede pública	l	7,30E-01	7,59E-01	7,30E-01	3,27E-01	3,35E-01	3,37E-01	3,59E-01	3,00E-01	8,29E-01	1,54E+00
Eletricidade	kWh	4,18E+00	4,19E+00	4,31E+00	4,13E+00	4,23E+00	4,29E+00	4,28E+00	4,42E+00	4,46E+00	4,39E+00
Gás natural	GJ	1,27E-01	1,27E-01	1,29E-01	1,27E-01	1,30E-01	1,29E-01	1,32E-01	1,34E-01	1,42E-01	1,42E-01
Gasóleo	MJ	8,72E-01	1,06E+00	9,37E-01	9,09E-01	9,08E-01	9,15E-01	1,01E+00	9,40E-01	5,74E-01	7,56E-01
Mat. embalagem: madeira	Número	4,41E-02	4,34E-02	3,80E-02	3,51E-02	2,94E-02	2,85E-02	2,85E-02	2,85E-02	2,99E-02	2,17E-02
Mat. embalagem: filme plástico	kg	3,55E-02	3,60E-02	3,60E-02	3,36E-02	3,08E-02	2,64E-02	2,20E-02	2,17E-02	2,00E-02	2,85E-02
Mat. embalagem: cinta	kg	3,09E-02	3,04E-02	2,64E-02	2,88E-02	1,89E-03	1,89E-03	1,89E-03	1,89E-03	2,00E-02	1,33E-02
Mat. embalagem: metal	kg	8,90E-04	8,63E-04	8,63E-04	8,09E-04	8,09E-04	5,40E-04	5,40E-04	5,40E-04	4,86E-04	4,86E-04
Mat. embalagem: cartão	kg	1,46E-02	1,37E-02	1,50E-02	1,55E-02	1,50E-02	1,46E-02	1,41E-02	1,42E-02	1,28E-02	1,10E-02
Transportes de matérias-primas: camião 25 ton	tkm	3,80E+00	4,06E+00	3,81E+00	3,80E+00	3,81E+00	3,81E+00	4,01E+00	4,01E+00	4,07E+00	3,97E+00

--não aplicável

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela 24 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m<sup>2</sup> de telha T2 (“saídas”)

Saídas	Unidades	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<i>Emissões para o ar</i>											
PM<10	kg	7,52E-03	7,30E-03	7,46E-03	4,89E-03	7,51E-04	7,30E-04	7,49E-04	7,21E-04	7,74E-04	4,55E-04
PM>10	kg	1,32E-03	1,28E-03	1,32E-03	8,63E-04	1,88E-04	1,82E-04	1,87E-04	1,80E-04	1,94E-04	1,14E-04
CO <sub>2</sub>	kg	8,48E+00	8,43E+00	8,48E+00	8,46E+00	8,70E+00	8,28E+00	8,49E+00	7,91E+00	8,30E+00	8,35E+00
HF	kg	9,58E-04	8,21E-04	1,63E-04	6,77E-04	5,60E-04	5,75E-05	9,05E-05	1,99E-04	2,60E-04	1,42E-04
HCl	kg	6,84E-04	5,02E-04	3,14E-05	2,13E-04	2,33E-03	2,38E-04	1,83E-04	3,13E-04	2,97E-04	1,53E-05
CO	kg	4,56E-03	5,93E-03	3,90E-03	3,38E-03	4,74E-03	4,60E-03	4,72E-03	5,46E-03	5,64E-03	6,57E-04
NO <sub>x</sub>	kg	1,19E-02	1,14E-02	1,19E-02	8,33E-03	6,78E-03	6,55E-03	6,72E-03	4,81E-03	5,91E-03	7,33E-03
COVNM	kg	1,41E-03	1,39E-03	6,13E-04	3,41E-04	9,17E-04	1,26E-03	1,30E-03	1,49E-03	1,50E-03	2,10E-04
SO <sub>x</sub>	kg	7,30E-03	8,21E-03	7,60E-03	4,23E-03	7,56E-03	4,53E-03	4,65E-03	4,03E-03	5,71E-03	4,31E-03
As	kg	9,12E-08	1,05E-07	3,52E-08	1,96E-08	7,07E-08	7,07E-08	7,07E-08	7,08E-08	6,64E-08	2,00E-08
Cd	kg	1,87E-07	2,83E-07	1,70E-07	9,46E-08	3,42E-07	3,42E-07	3,42E-07	3,43E-07	3,21E-07	9,66E-08
Cr	kg	n.d.	5,47E-07	5,79E-07	3,22E-07	1,16E-06	1,16E-06	1,16E-06	1,17E-06	1,09E-06	3,28E-07
Cu	kg	3,24E-08	3,88E-08	2,14E-08	1,06E-08	3,96E-08	3,95E-08	3,98E-08	3,99E-08	5,83E-10	7,32E-09
Hg	kg	n.d.	n.d.	8,51E-08	4,73E-08	1,71E-07	1,71E-07	1,71E-07	1,71E-07	1,61E-07	4,83E-08
Ni	kg	1,73E-06	1,69E-06	8,17E-07	4,54E-07	1,64E-06	1,64E-06	1,64E-06	1,65E-06	1,54E-06	4,64E-07
Pb	kg	1,69E-06	1,73E-06	1,70E-06	9,46E-07	3,42E-06	3,42E-06	3,42E-06	3,43E-06	3,21E-06	9,66E-07
Zn	kg	8,21E-07	7,52E-07	7,32E-07	3,61E-07	1,35E-06	1,35E-06	1,36E-06	1,36E-06	1,99E-08	2,50E-07
<i>Emissões para a água</i>											
Sólidos suspensos	kg	2,28E-06	2,96E-06	3,19E-06	2,87E-06	2,46E-06	1,92E-07	2,03E-06	4,04E-06	2,09E-06	1,75E-06
Carência bioquímica de oxigénio (CBO5)	kg	4,06E-06	2,96E-06	3,78E-06	2,51E-06	2,01E-06	8,49E-07	9,08E-07	6,66E-06	2,81E-06	5,26E-06

Tabela 24 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m<sup>2</sup> de telha T2 (“saídas”) (continuação)

Saídas	Unidades	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Carência química de oxigénio (CQO)	kg	1,14E-05	9,58E-06	5,02E-06	4,33E-06	2,74E-06	1,21E-06	1,30E-06	9,52E-06	4,01E-06	7,52E-06
Óleos e gorduras	kg	1,50E-07	1,23E-07	9,58E-08	6,84E-08	5,93E-08	5,11E-08	5,24E-08	1,22E-07	7,52E-08	1,38E-07
Hidrocarbonetos	kg	1,60E-07	1,41E-07	1,00E-07	1,14E-07	7,75E-08	5,11E-08	5,24E-08	1,22E-07	7,52E-08	1,38E-07
Resíduos totais produzidos	kg	4,96E-01	4,66E-01	4,61E-01	4,66E-01	4,57E-01	4,52E-01	4,39E-01	4,17E-01	3,92E-01	3,60E-01
Resíduos valorizados	kg	2,48E-01	2,33E-01	2,54E-01	2,66E-01	2,74E-01	2,85E-01	2,85E-01	2,71E-01	2,66E-01	2,52E-01
Resíduos não valorizados	kg	2,48E-01	2,33E-01	2,08E-01	2,00E-01	1,83E-01	1,67E-01	1,54E-01	1,46E-01	1,25E-01	1,08E-01
Resíduos perigosos	kg	4,80E-03	5,02E-03	5,24E-03	5,47E-03	5,93E-03	4,56E+01	9,12E+01	1,37E+02	1,82E+02	2,28E+02

n.d. – não disponível (dato não medido ou não disponibilizado pela empresa); --não aplicável



De um modo genérico verifica-se que os consumos energéticos (gás natural e eletricidade) são superiores quando se utiliza a tecnologia da mobília refratária (T2) face ao uso de arame (T1), o que pode ser explicado pelas necessidades térmicas que o próprio refratário possui, confirmado pela análise de inventário por unidade mássica (kg) e por unidade funcional (m<sup>2</sup>). Em consequência do maior consumo específico de gás natural em T2 ocorre também uma maior emissão de CO<sub>2</sub>. No entanto, e atendendo a que T2 possui um sistema de tratamento de efluentes gasosos consistindo num filtro de fluoretos por adsorção em cascata com brita calcária para precipitação de gases ácidos, SO<sub>2</sub> e alguns metais pesados, estas concentrações são mais baixas que as verificadas para T1 (sem qualquer tipo de tratamento de efluentes gasosos a jusante do forno). Ambas as instalações possuem sistemas de despoeiramento por via seca nas operações a montante da secagem, embora T2 disponha de mais sistemas de despoeiramento que T1.

No caso das emissões de partículas verifica-se que estas são muito díspares. Numa análise detalhada aos dados originais (boletins de caracterização das emissões gasosas) verificou-se que os primeiros anos são fortemente influenciados pelo elevado limite de quantificação do método de partículas, o que associado a caudais volumétricos elevados dos secadores conduz a emissões elevadas para concentrações abaixo da quantificação (mesmo considerando um terço desse limite, de acordo com a metodologia de reporte do PRTR). Em resultado da evolução tecnológica das técnicas e equipamentos de medição, os limites de quantificação de partículas tornaram-se mais baixos e consequentemente verificou-se uma redução drástica dos valores das emissões de partículas.

No que se refere a resíduos verifica-se que a produção de caco (principal resíduo resultante de não conformidades em termos de qualidade e quebras) é menor para T2, tecnologia com refratário e específica por telha, originando menos caco. No entanto, existem para T2 outras tipologias de resíduos, como sejam os resíduos associados aos moldes de gesso e os resíduos da brita de tratamento de gases, que não ocorrem em T1, pelo que no global T2 gera mais resíduos que T1.

No caso de T1 verifica-se que nos anos de 2008 e 2009 os consumos específicos de energia e matéria-prima são superiores, associados ao início da grave crise mundial que o sector sofreu, com um abaixamento de produção muito significativo (menos de metade) não acompanhado da necessária racionalização (muitos equipamentos funcionaram num regime menor). Verificou-se porém que a partir de 2010 existiu um esforço na racionalização de consumos de embalagens e energéticos, sem alterações de equipamentos, tecnologias ou combustíveis, mas com medidas de substituição de luminárias por outras mais eficientes, instalação de variadores de frequências nos motores existentes, e controlo de consumos energéticos (por exemplo no ar comprimido). A otimização de cargas do forno, com paragens programadas e trabalhos por campanhas face às encomendas foram medidas de redução de consumos energéticos no forno.

Já no caso de T2 verifica-se uma menor variabilidade nos valores de consumos e emissões, visto tratar-se de uma fábrica mais recente e mais otimizada ao longo de todo o período analisado, e cuja evolução temporal não sofreu grandes alterações verificando-se mesmo que a produção foi sendo aproximadamente constante ao longo do tempo (tendo sofrido decréscimos significativos de 30 % apenas em 2013 e 2014). Neste contexto, o decréscimo do desempenho poderá ser justificado face à degradação dos equipamentos ao longo do tempo e à menor otimização (face à menor produção).

No caso dos materiais de embalagem, parâmetros não relacionados com a tecnologia de fabrico, verificou-se que T1 tem um consumo específico de paletes que reflete a produção de algumas meias cargas, a localização da unidade fabril mais interior do país e por conseguinte uma menor recuperação de paletes (em sistema de consignação). Já T2, apesar de ter uma localização mais favorável e uma retoma significativa a nível nacional, é uma empresa que exporta uma parte relevante da sua produção (cerca de 30-40%) logo a retoma de paletes nestes mercados estrangeiros é inexistente ou muito limitada. Verifica-se que T2 utiliza ainda o cartão como material intercalar a separar as cargas, enquanto T1 não o usa. Em ambas verifica-se um decréscimo significativo e racionalização de consumos de embalagem ao longo do tempo, particularmente para T1.

Já o gásóleo consumido, nomeadamente em equipamentos de emergência, transportes e movimentação de cargas internas, é superior para T1 quando comparado com T2, justificado não por razões da tecnologia de fabrico, mas antes pelo facto de os equipamentos de transporte de T1 serem anteriores aos de T2 e por conseguinte possuírem consumos mais elevados. Quanto aos transportes externos, T1 recorre a matérias-primas com uma maior proximidade que T2, bem como a menos fornecedores.

No que se refere ao consumo de água verifica-se que T2 apresenta um maior consumo, explicado pelo facto de esta ser utilizada no fabrico de moldes de gesso (inexistente em T1), para além dos habituais consumos na preparação de pasta cerâmica.

Finalmente refira-se que T1 é uma empresa com uma capacidade instalada menor, de cariz mais familiar, enquanto T2 possui uma gestão mais profissional e uma capacidade produtiva instalada de cerca de três vezes superior à de T1.

#### **4.2.2.5 Avaliação de impactes ambientais**

De forma a avaliar os impactes ambientais da telha Lusa foram escolhidas as categorias e métodos já descritos no estudo de caso anterior (tijolo), pelo que na **Tabela 12** consta para cada parâmetro ambiental, a unidade, os métodos e referências bibliográficas usadas (tal como já apresentado para o tijolo).

Esta escolha das categorias de impacto teve por base critérios de relevância dos temas ambientais para a telha cerâmica, nomeadamente:

- dados de inventário disponíveis;
- categorias de impacto identificadas em estudos anteriores de ACV em materiais cerâmicos (Almeida et al., 2014a, 2015a; Souza et al., 2015);
- categorias de impacto definidas na norma EN15804+A1 (CEN, 2013) sobre regras de base para as categorias de produtos de construção, como é a telha cerâmica;
- categorias de impacto ambientais previsíveis face a novos instrumentos entretanto publicados como a PAP (CE, 2013);
- coerência com as categorias de outros materiais cerâmicos (ex. tijolo, pavimento e revestimento);
- robustez dos métodos e sua aceitação por partes interessadas.

### 4.2.3 Resultados e discussão

O potencial impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida (abordagem do berço ao túmulo) nos anos de 2005/2006 a 2014, utilizando os métodos de avaliação de impactos referidos, é apresentado por unidade funcional ( $1 \text{ m}^2$ ) nas tabelas A.5 e A.6 do anexo A.3 respetivamente para as telhas Lusa T1 e T2. Já o desempenho de T1 e T2 por unidade declarada ( $1 \text{ kg}$ ) está representado no anexo A.3 nas tabelas A.7 e A.8, respetivamente.

Para a abordagem do berço ao portão o desempenho por unidade funcional ( $1 \text{ m}^2$ ) consta das tabelas A.9 e A.10, enquanto por unidade declarada ( $1 \text{ kg}$ ) consta das tabelas A.11 e A.12 do anexo A.3 respetivamente para T1 e T2.

É de salientar que estes resultados não incluem a produção e manutenção de bens de capital, tais como edifícios, maquinaria, equipamentos, etc. (excluídos das fronteiras do sistema).

#### 4.2.3.1 Abordagem do berço ao túmulo

Da Figura 45 à Figura 59 ilustra-se o contributo relativo de cada etapa do ciclo de vida, para o impacto ambiental total para cada uma das categorias de impacto ambiental em estudo, incluindo a etapa de produto (A1 a A3) composta por extração, o transporte e fabrico da telha, o módulo de transporte de produto (A4), o módulo de construção e instalação (A5), a etapa de utilização (B) até à etapa C (fim de vida), ou seja do berço ao túmulo.

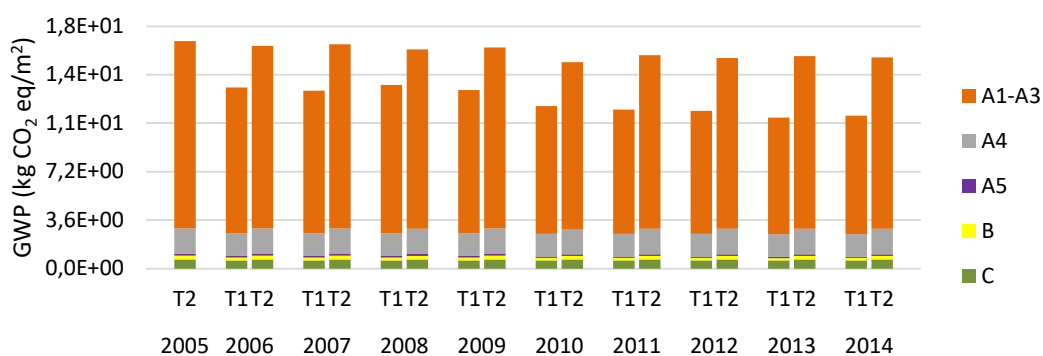


Figura 45 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para o aquecimento global (GWP) por m<sup>2</sup> de telha

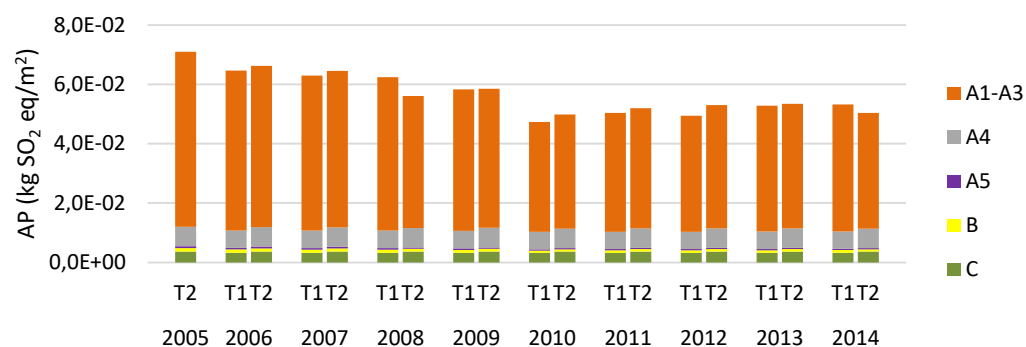


Figura 46 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a acidificação (AP) por m<sup>2</sup> de telha

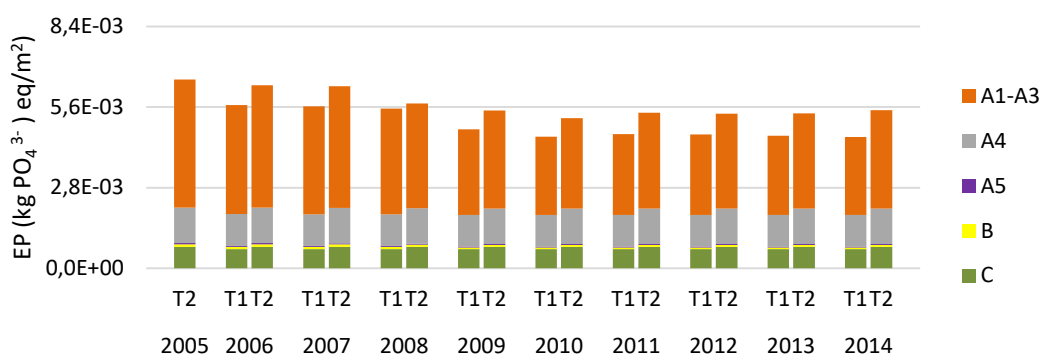


Figura 47 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a eutrofização (EP) por m<sup>2</sup> de telha

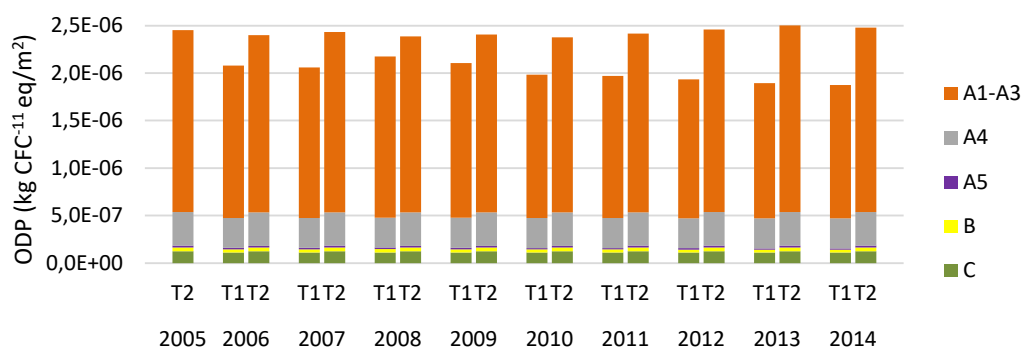


Figura 48 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a depleção da camada de ozono (ODP) por m² de telha

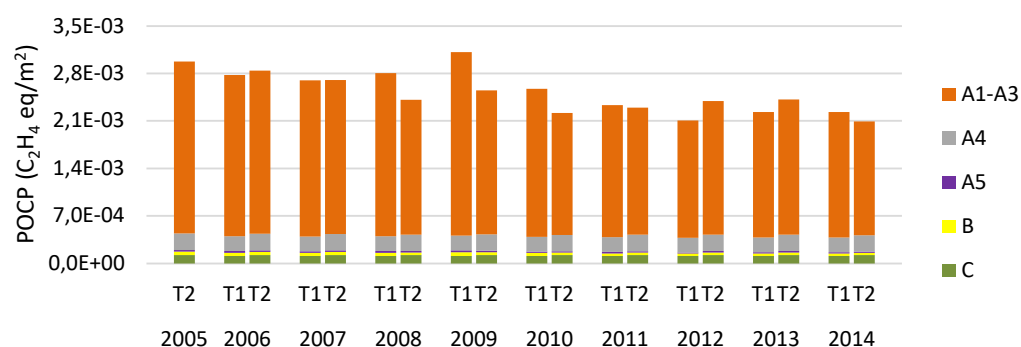


Figura 49 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a Oxidação fotoquímica (POCP) por m² de telha

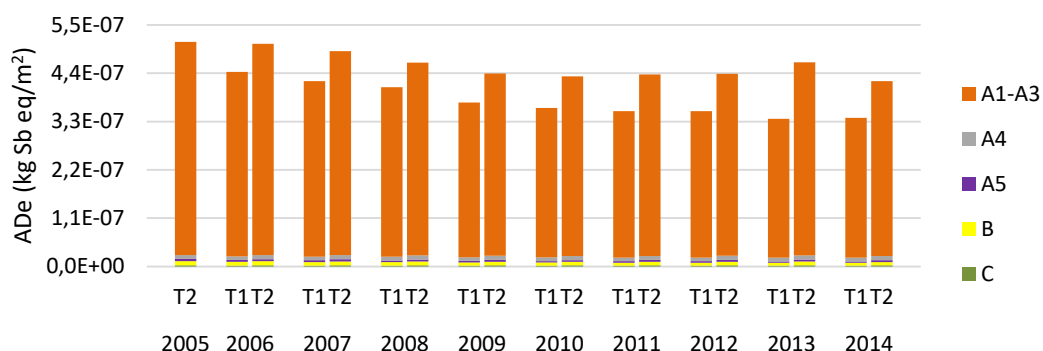


Figura 50 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por m² de telha

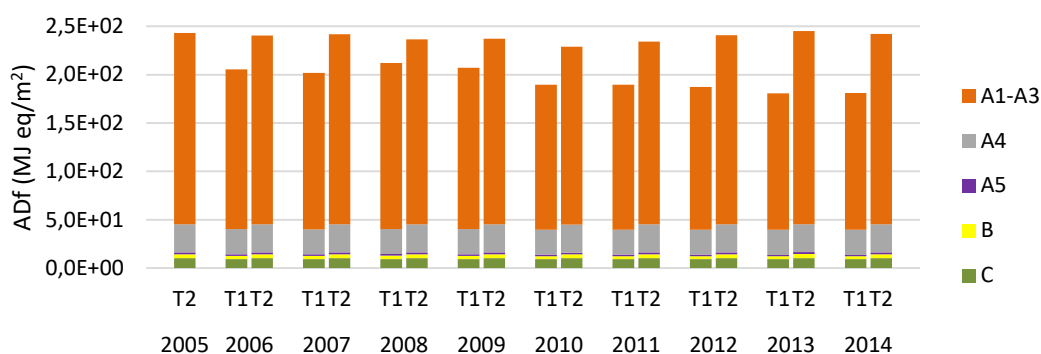


Figura 51 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a Depleção de recursos – fósseis (ADf) por m² de telha

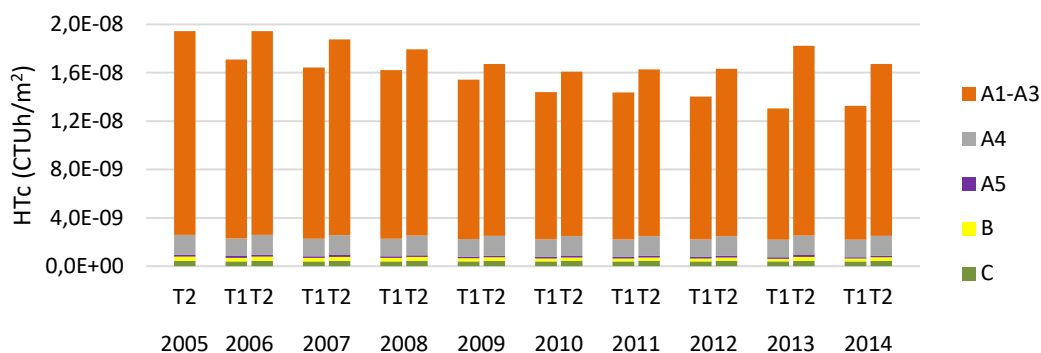


Figura 52 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – cancerígena (HTc) por m² de telha

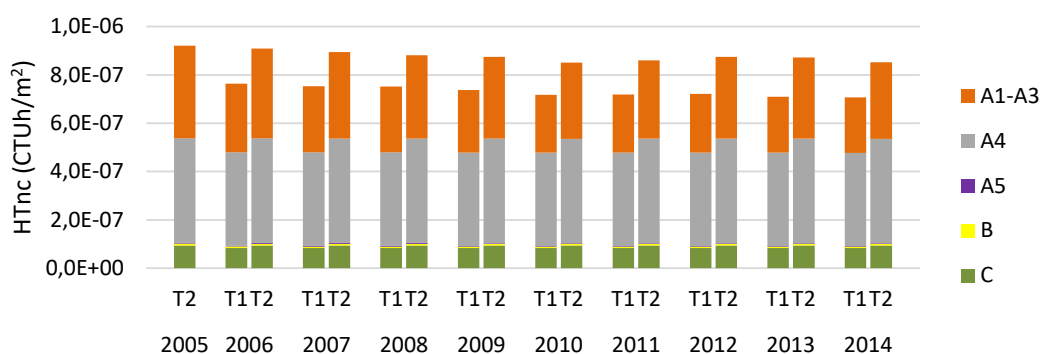


Figura 53 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m² de telha

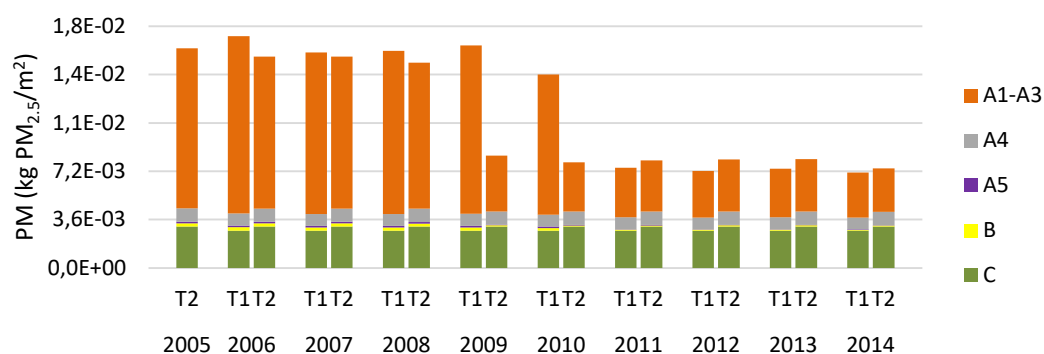


Figura 54 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para partículas (PM2.5) por m² de telha

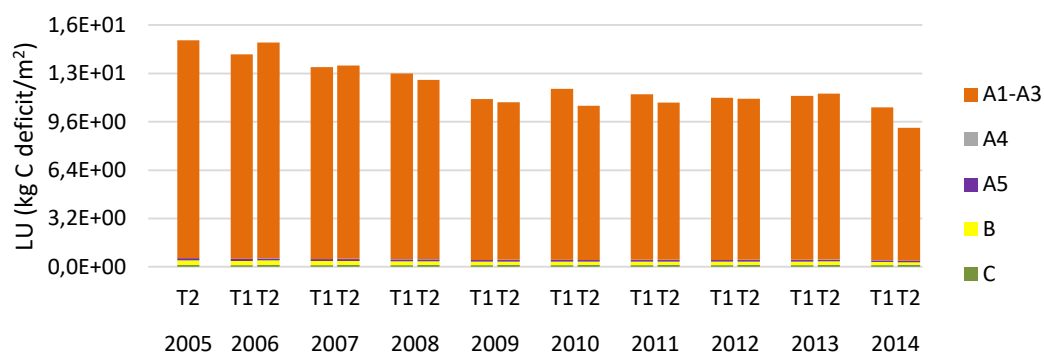


Figura 55 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para uso do solo (LU) por m² de telha

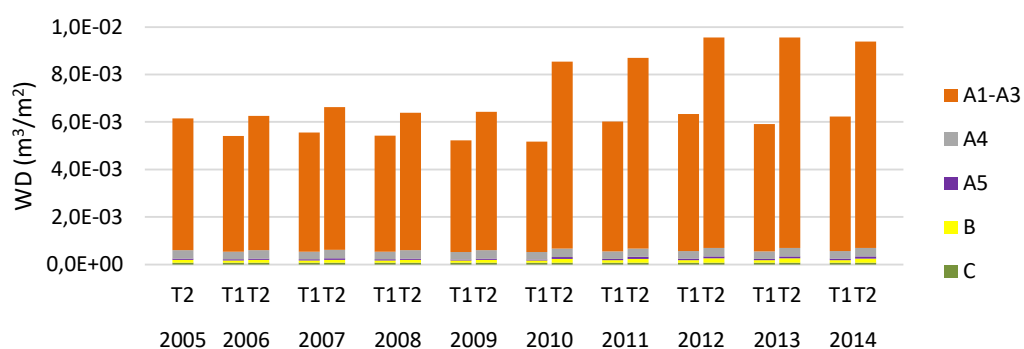


Figura 56 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para depleção da água (WD) por m² de telha

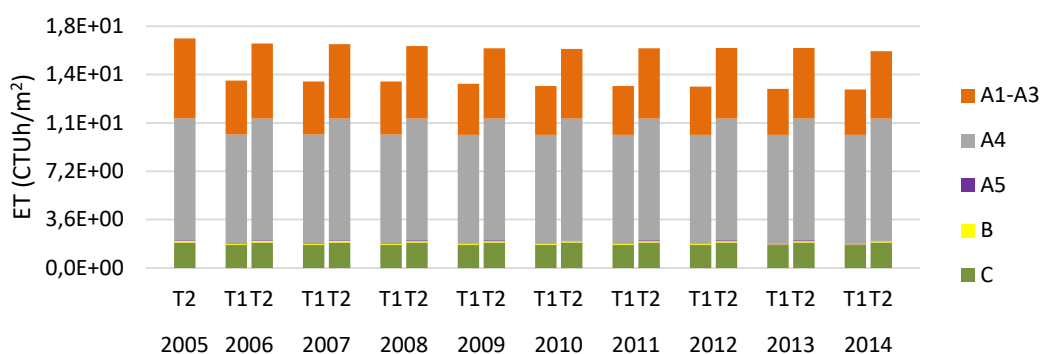


Figura 57 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para ecotoxicidade (ET) por m² de telha

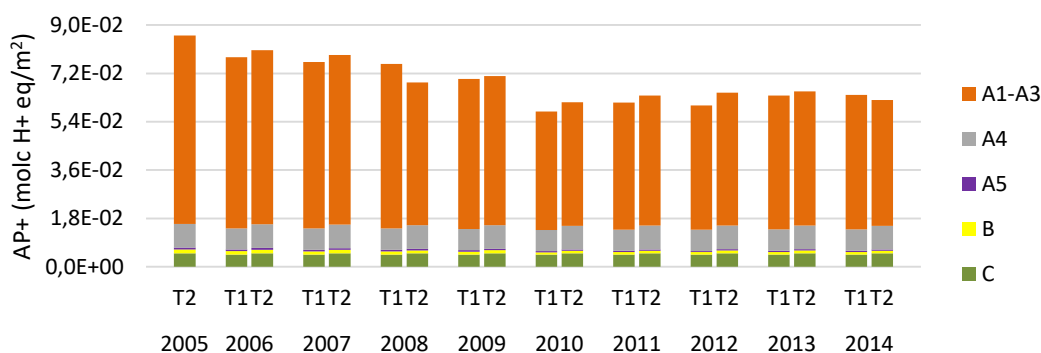


Figura 58 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para acidificação pelo método ILCD (AP+) por m² de telha

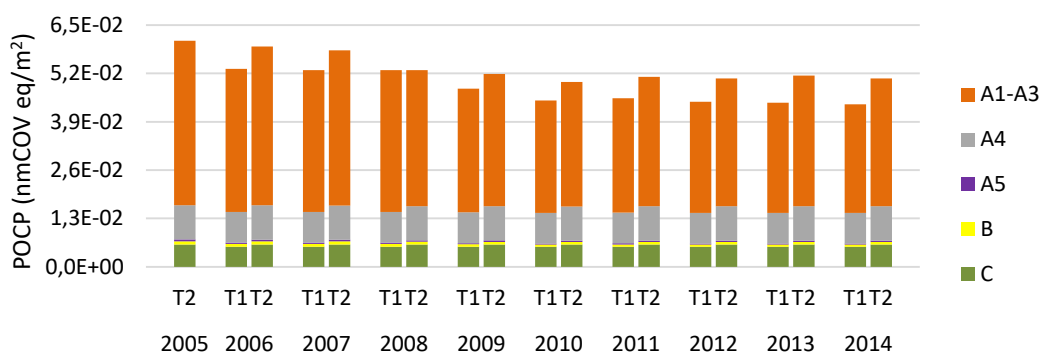


Figura 59 – Contributo de cada etapa do ciclo de vida para oxidação fotoquímica pelo método ILCD (POCP+) por m² de telha



### i. Análise geral

Para a maioria das categorias de impacto em estudo o ano de 2014 apresenta menores impactos (redução de 5% a 23% para T1 e de 0% a 38% para T2 face ao ano de base), à exceção da depleção de água que aumenta em ambas, embora de modo mais significativo em T2 que tem mais fontes de consumo. Para estas reduções contribuem favoravelmente quer os esforços em poupanças energéticas na fábrica (eletricidade e gás natural) e em termos de embalagem, sem recorrer a alterações de tecnologia, como se induz da análise de inventário, quer a evolução favorável do mix energético nacional. De notar que a redução para partículas não foi considerada nesta análise face às limitações apontadas anteriormente associadas a elevados limites de quantificação dos métodos de amostragem e análise de efluentes gasosos no início da década de dados em estudo.

### ii. Contributo de cada etapa do ciclo de vida

O contributo percentual de cada etapa do ciclo de vida é muito semelhante para T1 e para T2. A etapa do berço ao portão (módulos de A1 a A3) é a mais significativa para todas as categorias de impacto exceto para a toxicidade humana não cancerígena e ecotoxicidade, onde o módulo A4 (transporte do produto final) assume a posição mais relevante. Este comportamento é semelhante ao verificado para os demais materiais cerâmicos em estudo, onde a etapa do berço ao portão assume a posição maioritária para grande parte das categorias de impacto em estudo.

Assim, a etapa A1-A3, representa em ambas (T1 e T2) entre:

- 25 a 40% - toxicidade humana não cancerígena e ecotoxicidade (não dominante);
- 40 a 55% - matéria particulada (PM2.5) (últimos quatro anos);
- 55 a 70% - eutrofização e oxidação fotoquímica (ILCD);
- 70 a 85% - aquecimento global, acidificação (CML-IA e ILCD), depleção da camada de ozono, oxidação fotoquímica (CML-IA), depleção de recursos fósseis e toxicidade humana cancerígena;
- mais de 90% - Depleção de recursos elementos, uso do solo e depleção da água.

A etapa de construção (A4 e A5) é a mais significativa para a ecotoxicidade e para a toxicidade humana não cancerígena. O módulo de transporte/distribuição do produto (A4), baseada num cenário de transporte por camião de 25 toneladas com um percurso de 300 km de distância, é a etapa mais relevante para a toxicidade humana não cancerígena (na ordem dos 50%) e ecotoxicidade (na ordem dos 55%). Representa a segunda mais relevante (8% a 24%) para uma parte significativa das categorias de impacto destacando-se o aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozono, oxidação fotoquímica, depleção de recursos fósseis, toxicidade humana cancerígena e PM2.5.

A construção (A5), influenciada pelas perdas em obra, e a etapa de uso (B), influenciada pelas eventuais substituições de peças no telhado e limpezas, são as que apresentam menores contributos (inferiores a 2%), tal como seria de esperar face à tipologia de tarefas envolvidas e ao cariz esporádico das mesmas.

Por fim, a etapa de fim de vida (C) é a segunda mais relevante para a categoria de impacto das partículas (37 a 41% nos últimos anos) explicada pela tipologia de ações desenvolvidas na demolição e desconstrução e consequentes impactos na qualidade do ar. Para as restantes categorias de impacto apresenta contributos residuais ou pouco significativos.

Tal como para outros estudos de caso, também para a telha se constata que o comportamento determinado pelos dois métodos distintos (CML-IA e ILCD) é muito semelhante para a acidificação quer ao longo do tempo quer por etapa do ciclo de vida. No entanto, para a oxidação fotoquímica verificam-se disparidades entre o CML-IA e o ILCD, pois é distinto o contributo para as etapas ou módulos, nomeadamente A4 e C, explicado por os métodos atribuírem fatores de caracterização distintos e considerarem algumas substâncias diferentes.

De um modo geral, T2 apresenta impactos superiores por unidade funcional (1 m<sup>2</sup>), associados quer ao maior peso específico da telha, quer principalmente à etapa A1-A3 (influenciada pela tecnologia de refratário que consome mais energia e consequentemente gera mais emissões), exceto para a acidificação e uso do solo. Estas exceções são explicadas por T2 possuir um filtro de fluoretos a jusante do forno que diminuiu a concentração de gases ácidos e de dióxido de enxofre, que contribuem para menores valores de acidificação na etapa A3. Já no caso do uso do solo a área de implantação disponível de T1 é bastante superior à de T2 por unidade funcional, ao que acresce o maior contributo das paletes de madeira em T1 (encomendas mais pequenas e menos retoma de paletes). Estas diferenças são mais evidenciadas por unidade declarada (1 kg), onde não existe a variável do peso específico da telha, e este comportamento é mais acentuado para a acidificação e uso do solo, ao que acresce a oxidação fotoquímica (CML-IA). Durante a abordagem do berço ao portão esta questão será detalhada.

#### **4.2.3.2 Abordagem do berço ao portão**

A etapa do berço ao portão (A1-A3) é pormenorizada em função dos diversos processos que a compõem (Figura 60 a Figura 74), uma vez que é a mais significativa para a maioria das categorias de impacto em estudo. Os processos unitários considerados foram os seguintes:

- produção de matérias-primas e auxiliares, designada abreviadamente na legenda por “Prod. MP e aux”;
- produção de materiais de embalagem, designada por “Prod. embalagem”;

- produção de combustíveis, designada por “Prod. combustíveis”;
- produção de eletricidade, designada por “Prod. eletricidade”;
- tratamentos de águas, água residual e resíduos, designada por “Trat. emissões”;
- atividades decorrentes na fábrica de telha, designada por “Ativid. na fábrica”;
- as atividades de transporte de matérias-primas e materiais auxiliares dos locais de extração e/ou processamento para a fábrica, designada por “Transporte”.

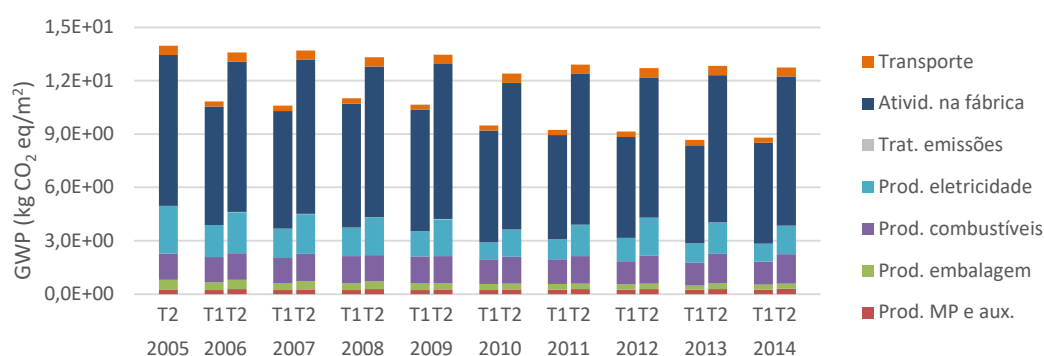


Figura 60 – Contributo de cada processo (etapa A1-A3) para o aquecimento global (GWP) por m² de telha

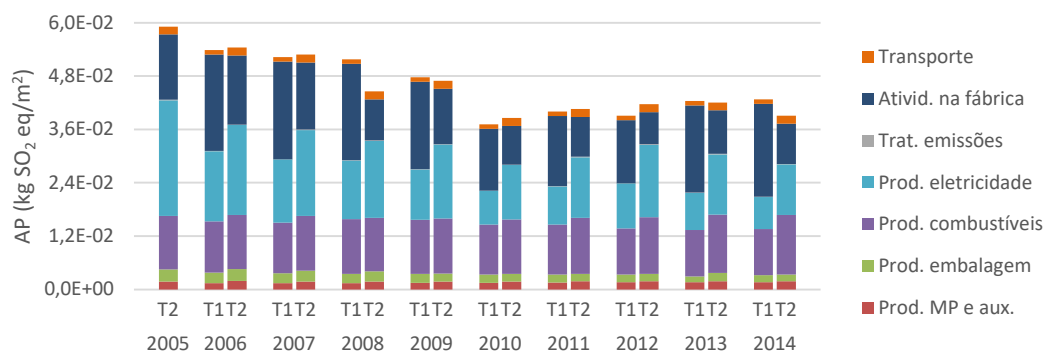


Figura 61 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a acidificação (AP) por m² de telha

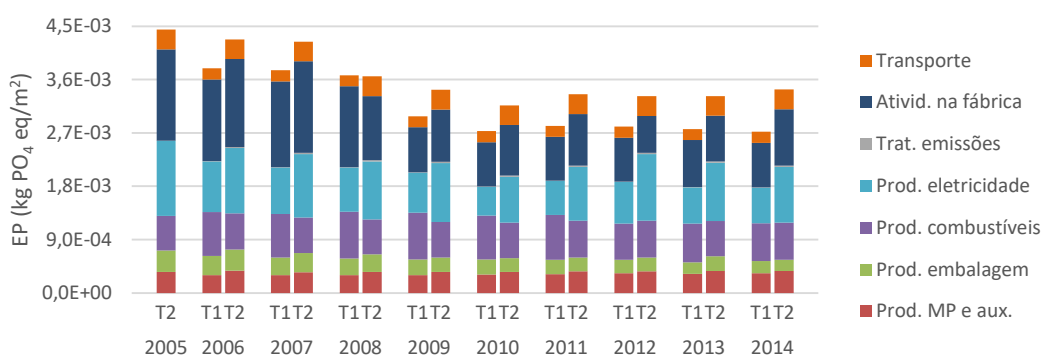


Figura 62 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a eutrofização (EP) por m² de telha

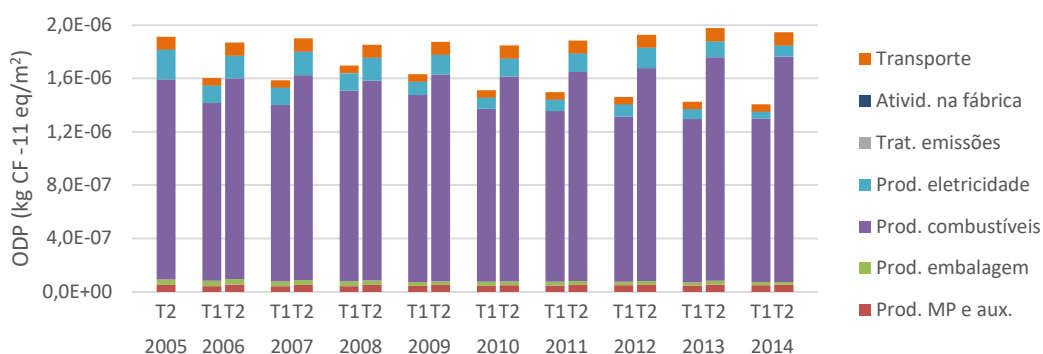


Figura 63 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a camada de ozono (ODP) por m² de telha

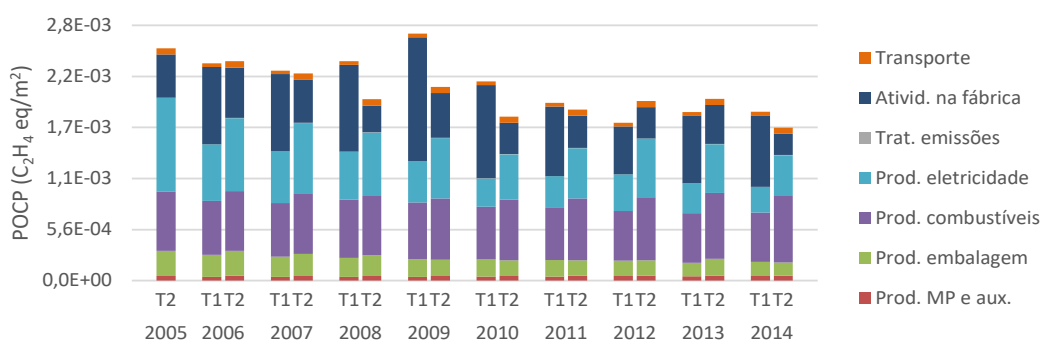


Figura 64 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a oxidação fotoquímica (POCP) por m² de telha



Figura 65 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a depleção de recursos – fósseis (ADf) por m² de telha

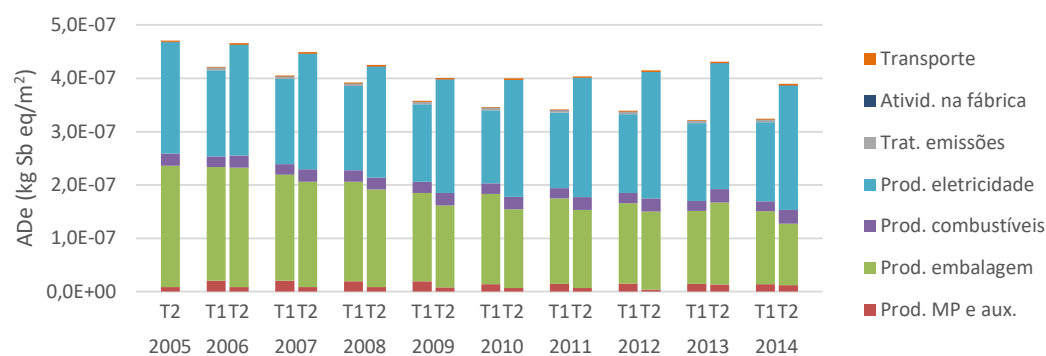


Figura 66 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a Depleção de recursos abióticos – elementos (ADE) por m² de telha

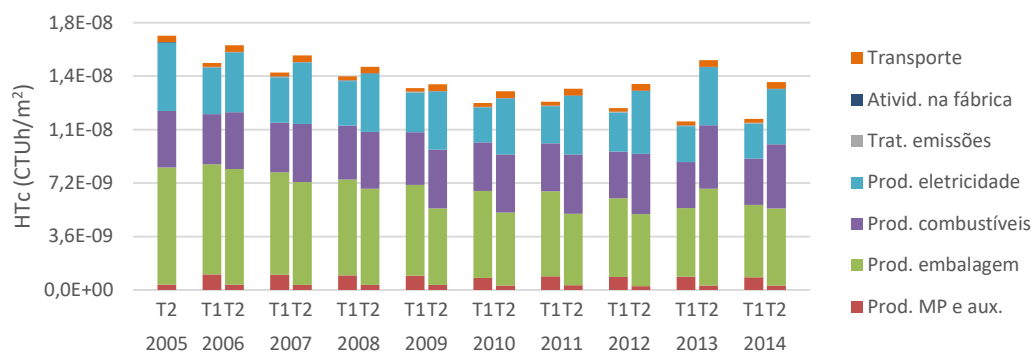


Figura 67 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – cancerígeno (HTc) por m² de telha

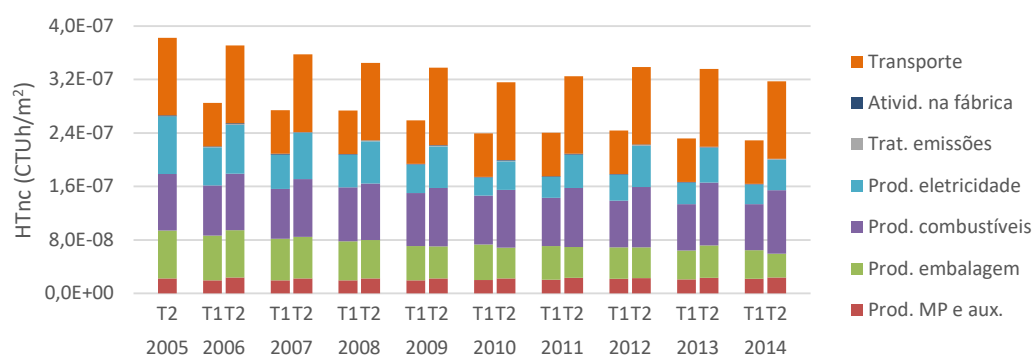


Figura 68 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m² de telha

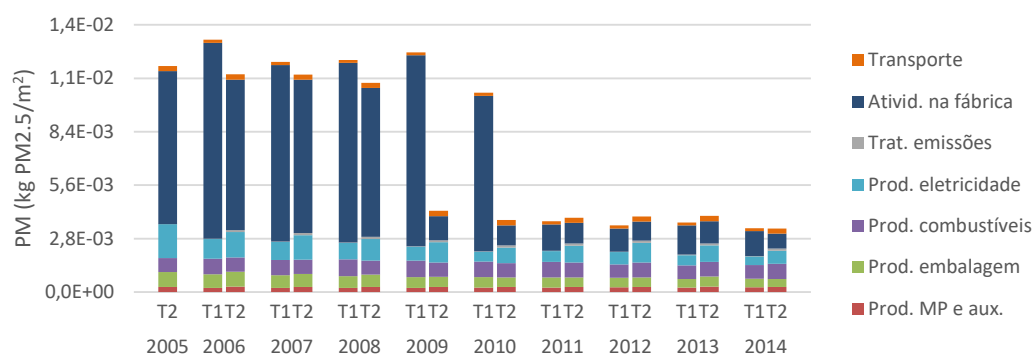


Figura 69 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para partículas (PM2.5) por m² de telha

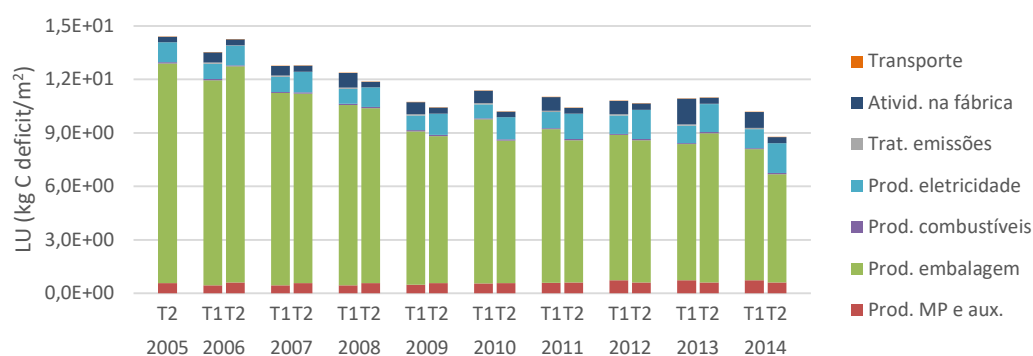


Figura 70 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para uso do solo (LU) por m² de telha

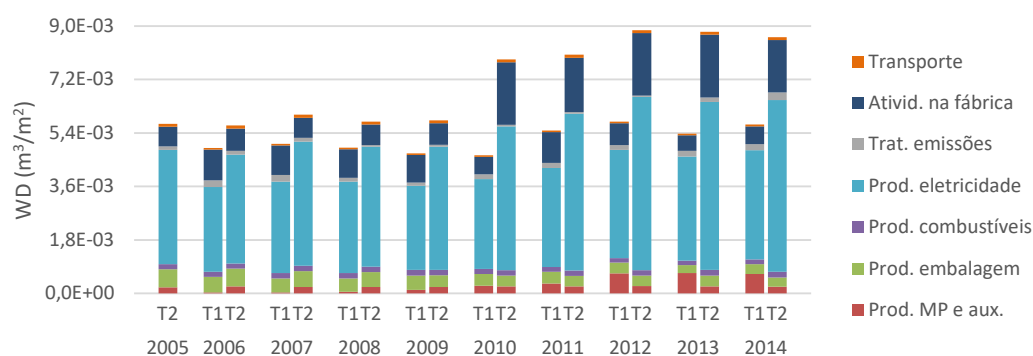


Figura 71 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para depleção da água (WD) por m² de telha

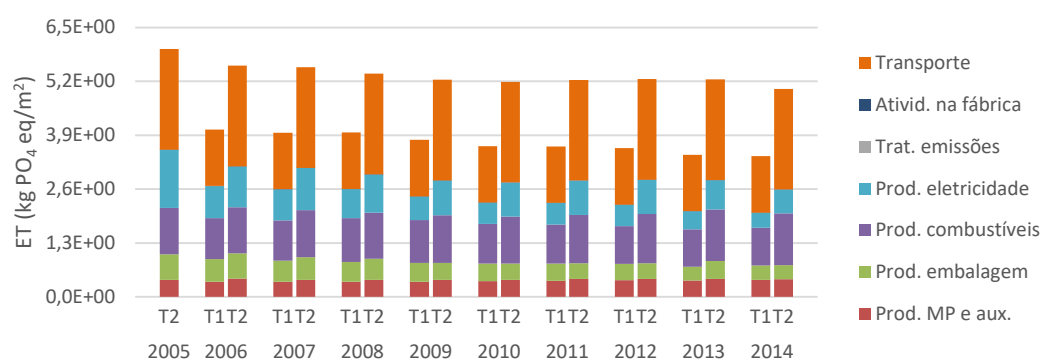


Figura 72 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para ecotoxicidade (ET) por m² de telha

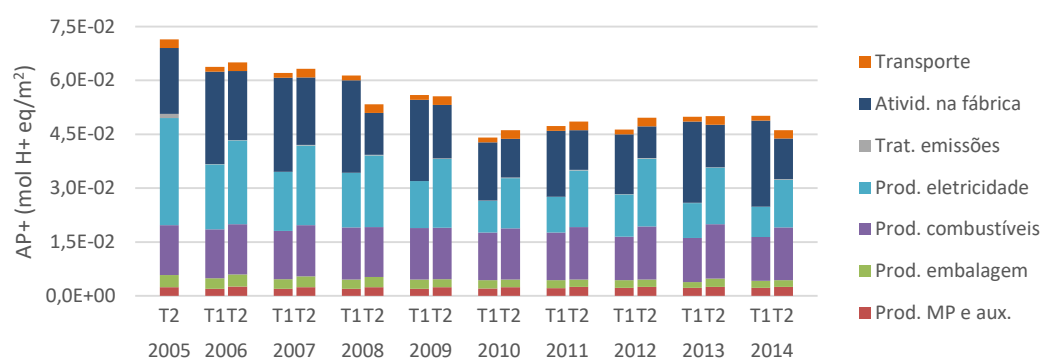


Figura 73 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para acidificação pelo método ILCD (AP+) por m² de telha

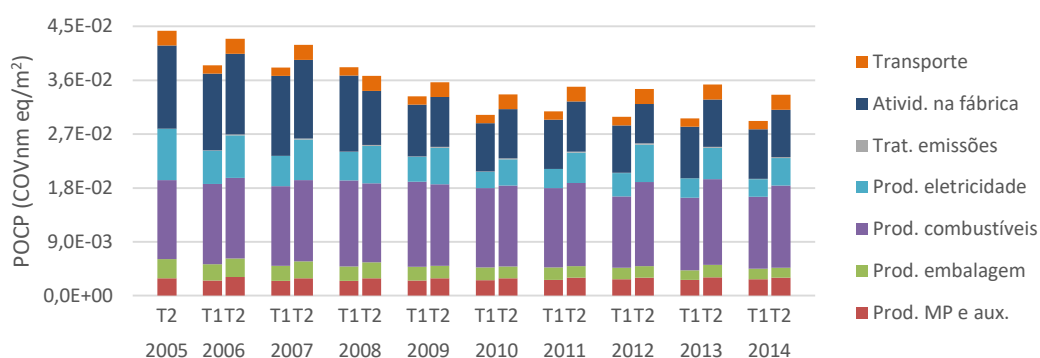


Figura 74 – Contributo de cada processo (da etapa A1-A3) para Oxidação fotoquímica pelo método ILCD (POCP+) por m² de telha

### i. Comportamento por categoria de impacte

O aquecimento global atinge valores superiores para T2, tal como esperado face a uma emissão superior de CO<sub>2</sub> (responsável por mais de 95% das emissões nesta categoria), explicado pela necessidade de maior consumo de gás natural para “aquecer” o refratário. Verifica-se que ao longo do tempo os impactes vão diminuindo ligeiramente quer para T1 quer para T2 face às otimizações entretanto alcançadas, uma vez que no período em análise não houve qualquer mudança significativa de combustível ou modo de queima nas “atividades da fábrica” (contribuinte maioritário com mais de 62%).

Os valores de impacte determinados para a acidificação (CML-IA e ILCD) são semelhantes em T1 e em T2, diminuindo ao longo do tempo, embora explicados por diferentes contributos de processos. Assim, para T1 os maiores contribuintes são as “atividades na fábrica” seguido da “produção de combustíveis” e “produção de eletricidade”, enquanto em T2 se verifica o inverso (“produção de combustível”, “produção de eletricidade” e “atividades na fábrica”). Este comportamento deverá estar associado ao maior consumo de energia (combustível e elétrica) em T2 (face ao refratário e preparação de pasta respetivamente) e, por outro lado, à existência de um filtro de fluoretos em T2 (inexistente em T1), que reduz a concentração de gases ácidos (HF e HCl), SO<sub>2</sub> e alguns metais. É de referir que o SO<sub>2</sub> é o maior contribuinte (superior a 72%) para esta categoria, seguindo-se o NO<sub>x</sub> (20 a 25%) e, de modo residual, a amónia e outros gases ácidos (HF e HCl).

Na oxidação fotoquímica (CML-IA) também se verifica um comportamento afim ao descrito para a acidificação no que respeita aos principais processos contribuintes em T1 e T2. Porém para além do SO<sub>2</sub> também os COVs contribuem para esta categoria. Na oxidação fotoquímica (ILCD) sobressai mais o processo da “produção de combustíveis”.

Na eutrofização verifica-se que T1 possui menores impactes que T2, sendo que têm diminuído ao longo do tempo. Os processos que mais contribuem são também as “atividades na fábrica”, seguidas da “produção de eletricidade” e da “produção de



combustíveis”. O comportamento é justificado pela libertação de NO<sub>x</sub>, principal responsável por esta categoria, e que é mais significativo para T2 por causa da mobília refratária que induz maiores consumos de gás natural e maiores emissões de NO<sub>x</sub>, associado ainda ao maior consumo específico de eletricidade, pelas razões já apontadas.

Na depleção da camada de ozono também se verifica que T1 tem melhor desempenho, como expectável por consumir menos combustível, uma vez que a “produção de combustíveis” é responsável por mais de 85% do impacte, inerente ao uso de gases de refrigeração com substâncias depletoras da camada de ozono para o arrefecimento do gás natural. O maior contribuinte é o bromotrifluorometano (Halon 1301). Igualmente para a depleção de recursos fósseis, a “produção de combustíveis” assume o processo mais relevante (superior a 73%) sendo como expectável o melhor desempenho alcançado por T1 (“telha aramada”) já que possui um menor consumo específico de gás natural.

No que respeita à depleção de recursos (elementos), a “produção da eletricidade” é o maior contribuinte particularmente nos últimos anos (45 a 60%), seguindo-se a “produção de embalagem” (maior contribuinte para T1 nos primeiros anos). Neste contexto T2 apresenta um pior desempenho que T1, uma vez que tem um maior consumo específico de eletricidade (associado a mais consumidores na zona da preparação de pasta e mais automatismos).

No que respeita à toxicidade humana (HTc e HTnc) e ecotoxicidade, registam-se os maiores valores para a T2 particularmente para toxicidade não cancerígena e ecotoxicidade, influenciado pelo “transporte” de matérias-primas que é mais longo que o verificado em T1 e ainda pela “produção de combustíveis” superior. Já para a toxicidade cancerígena se verifica que os processos mais relevantes são a “produção de embalagem”, “produção de combustíveis” e “produção da eletricidade”. Os metais pesados são os que mais contribuem para estas categorias de impacte.

No caso das partículas (PM<sub>2.5</sub>) (últimos quatro anos) verifica-se uma maior homogeneidade nas telhas, como seria de esperar uma vez que ambas estão a gás natural (baixo emissor por não conter cinzas) e possuem sistemas de tratamento de partículas (despoeiramentos nas seções de preparação de pasta e conformação). No entanto, T2 apresenta valores ligeiramente superiores associados à “produção de combustíveis”, apesar das “atividades na fábrica” surgirem como o processo mais significativo (25 a 42%).

Para o uso do solo verifica-se que a “produção de embalagem” (particularmente paletes de madeira) é muito relevante (superior a 65%) como seria de esperar face às operações envolvidas no crescimento da madeira. Apesar de não ser muito distinto nem uniforme no tempo verifica-se que, para a maioria dos anos, T1 possui valores absolutos ligeiramente superiores, associados a uma maior quantidade de paletes de madeira por m<sup>2</sup> (uma vez que vende encomendas mais pequenas compostas por meias cargas, o peso das telhas por palete é menor e localiza-se mais no interior do país sendo a retoma menor).

Finalmente para a depleção da água a “produção de eletricidade” assume-se como a mais relevante (superior a 58%), o que deverá estar associado às necessidades de arrefecimento nas centrais termoelétricas. De mencionar que os maiores impactes atingem-se para T2, explicados pelo maior consumo específico de eletricidade conforme já explanado.

Neste contexto, e da análise da Figura 60 à Figura 74, pode-se constatar que:

- a “produção de matérias-primas e auxiliares” não é relevante para nenhuma das categorias de impacto;
- a “produção de embalagem” é o processo dominante para o uso do solo (acima de 65%), toxicidade humana cancerígena (36% a 49%), e depleção de recursos elementos (apenas em T1 e nos primeiros anos);
- a “produção de combustíveis” é o maior contribuinte (71% a 87%) para a depleção de recursos fósseis, para a depleção da camada de ozono (face aos arrefecimentos) e ainda para a oxidação fotoquímica (ILCD) (30% a 44%). Apresenta ainda um contributo moderado para a acidificação (CML-IA e ILCD), eutrofização, oxidação fotoquímica (CML-IA), toxicidade humana (cancerígena e não cancerígena) variando de 21% a 31%;
- a “produção da eletricidade” é o processo dominante para a depleção da água (58% a 71%), depleção de recursos elementos (últimos anos) (41% a 60%) e acidificação (31% a 44% para T2). Assume uma posição de destaque (segunda posição) para a acidificação (para T1), eutrofização, oxidação fotoquímica, depleção de recursos (elementos) e ecotoxicidade variando de 20% a 44%;
- o “tratamento de águas, águas residuais, resíduos” é o processo menos relevante para todas as categorias de impacto (representando menos de 1%);
- as “atividades na fábrica” são dominantes para o aquecimento global (61% a 67%); partículas (25% a 39%). E ainda a oxidação fotoquímica (CML-IA) e acidificação mas apenas em T1 (28% a 49%). Este processo é ainda relevante para a grande maioria das categorias de impacto;
- o “transporte” é o processo dominante para a ecotoxicidade (34% a 48%), apresentando um contributo moderado (18% a 25%) para a toxicidade humana (não cancerígena).

## ii. Contributo da infraestrutura

A Tabela 25 e a Tabela 26 apresentam a contribuição das infraestruturas (produção e manutenção de bens de capital) nos resultados da abordagem do berço ao portão (A1-A3), respetivamente para T1 e T2, para avaliar a sua influência nos resultados.

*Tabela 25 – Contributo das infraestruturas na abordagem do berço ao portão da telha T1 (%)*

<b>Categoria de impacte</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
Aquecimento global (GWP)	4	4	4	4	4	5	5	5	5
Acidificação (AP)	5	5	6	6	7	7	7	6	6
Eutrofização (EP)	11	11	11	13	14	14	14	14	14
Oxidação fotoquímica (POCP)	7	7	7	6	7	8	9	8	8
Depleção da camada de ozono (ODP)	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Depleção de recursos elementos (ADe)	96	96	96	96	96	96	97	97	97
Depleção de recursos fósseis (ADf)	3	3	3	3	4	4	4	4	4
Toxicidade humana, efeito cancerígeno	75	75	76	76	78	78	78	79	79
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	34	34	35	35	37	37	37	38	38
Matéria particulada (PM2.5)	3	3	4	3	4	10	11	10	11
Uso do solo (LU)	49	51	52	55	52	53	53	52	53
Depleção da água (WD)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ecotoxicidade (ET)	16	16	16	16	17	17	17	17	18
Acidificação (A+)	6	6	6	6	7	7	7	7	6
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	6	6	6	7	7	7	7	7	7

*Tabela 26 – Contributo das infraestruturas na abordagem do berço ao portão da telha T2 (%)*

<b>Categoria de impacte</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
Aquecimento global (GWP)	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
Acidificação (AP)	5	5	6	6	6	7	8	7	7	7
Eutrofização (EP)	9	10	10	11	11	12	14	12	12	11
Oxidação fotoquímica (POCP)	7	7	7	8	8	9	10	8	8	9
Depleção da camada de ozono (ODP)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Depleção de recursos elementos (ADe)	94	94	94	95	95	95	96	95	95	95
Depleção de recursos fósseis (ADf)	3	3	3	3	3	3	4	3	3	3
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	69	69	70	70	72	73	78	73	71	72
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	24	25	25	26	26	27	34	26	27	27
Matéria particulada (PM2.5)	4	4	4	4	9	11	12	10	10	12
Uso do solo (LU)	55	54	56	58	61	61	62	60	60	65
Depleção da água (WD)	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Ecotoxicidade (ET)	10	11	11	11	11	12	14	12	12	12
Acidificação (A+)	5	6	6	7	6	7	8	7	7	7
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	6	6	6	7	7	7	8	7	7	7

Da análise da Tabela 25 e da Tabela 26 verifica-se que o contributo por categoria de impacto é muito semelhante ao longo dos anos, bem como entre T1 e T2, exceto no uso do solo, onde o contributo percentual das infraestruturas é menor para T1 comparativamente com T2 (conforme já mencionado T1 tem um impacto superior nesta categoria por estar implantada numa área superior e com uma produção de embalagens ligeiramente maior).

Constata-se que as infraestruturas (anexos de pedreira, instalação fabril e maquinarias) e consequentes atividades de extração de recursos minerais e a respetiva produção destes bens (ex. maquinaria em aço e ferro), exercem mais influência em categorias como a depleção de recursos abióticos (elementos) (94% a 97%), uso do solo (49% a 65%), toxicidade humana - efeito cancerígeno (69% a 78%) e toxicidade humana - efeito não cancerígeno (24% a 38%). Para as restantes categorias a influência é diminuta e em regra inferior a 10%, exceto eutrofização (9% a 14%) e ecotoxicidade (10% a 18%).

#### **4.2.3.3 Potenciais medidas de melhoria do impacto ambiental**

Neste capítulo serão estudadas medidas que possam contribuir para a melhoria do desempenho ambiental, tendo presente as MTDs do documento de referência BREF para a telha cerâmica (European Commission, 2007), nomeadamente medidas de eficiência energética e de minimização de emissões atmosféricas, particularmente para ponto(s) crítico(s) (“hotspots”) identificado(s) na abordagem do berço ao portão (A1-A3), ou seja, a cozedura.

Assim, para T1 e T2 será estudada a introdução de queimadores de alta velocidade para a combustão do gás natural, que promovem uma melhor homogeneização e uma redução da temperatura máxima de cozedura; uma melhoria no isolamento térmico no forno e nas condutas do sistema de recuperação de calor; e ainda a recuperação de ar quente dos gases de exaustão para a combustão. Com estas medidas estima-se uma redução de consumos na ordem dos 15%, com base na experiência de aplicação destas medidas em outras fábricas (Serrano et al., 2009), face ao desempenho de 2014. E ainda um payback de cerca de 4 anos.

Adicionalmente e com o objetivo de reduzir o consumo de eletricidade em 10%, prevê-se a substituição dos sistemas de iluminação na fábrica por outros mais eficientes (ex. LED). A esta medida corresponde um investimento aproximado de 7500 euros e um payback de cerca de 1 ano e 9 meses (Serrano et al., 2009).

No que respeita a T1 a implementação do filtro de fluoretos conduzirá também a uma redução das emissões de Fluoretos (40%), cloretos (10%), SO<sub>2</sub> (15%), tendo em consideração os VEA – valores de emissão associados ao BREF da indústria cerâmica, valores de concentração inicial (relativamente baixos) e eficiência destes equipamentos.

Nestas condições existirá um consumo adicional de carbonato de cálcio e de energia elétrica (assumiu-se 2%, face à experiência de aplicação desta MTD em outras fábricas).

Para T2 será mantida a tecnologia de fim de linha existente – filtro de fluoretos, uma vez que o desempenho se encontra alinhado com os VEA do BREF da indústria cerâmica.

A Tabela 27 apresenta a quantificação da redução do impacte ambiental (expressa em %) em relação ao desempenho inicial de 2014 para todas as ações de melhoria sugeridas (cenários), respetivamente para T1 (TA1) e para T2 (TA2).

*Tabela 27 - Percentagem de redução alcançada na telha por unidade funcional (1 m<sup>2</sup>)*

<b>Categoria de impacte - redução (%)</b>	<b>TA1</b>	<b>TA2</b>
Aquecimento global (GWP)	10,3	11,0
Acidificação (AP)	10,9	6,9
Eutrofização (EP)	6,0	4,6
Oxidação fotoquímica (POCP)	10,3	7,8
Depleção da camada de ozono (ODP)	10,5	10,8
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	4,0	6,7
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	10,2	10,6
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	5,0	6,3
Toxicidade humana, efeito não- cancerígeno (HTnc)	4,4	5,0
Matéria particulada (PM2.5)	7,0	4,8
Uso do solo (LU)	0,5	2,0
Depleção de recursos - água (WD)	5,2	7,0
Ecotoxicidade (ET)	4,0	4,1
Acidificação (ILCD) (A+)	10,5	6,6
Formação de ozono fotoquímico (ILCD) (POCP +)	7,4	6,2

As medidas propostas para T1 (cenário TA1), apesar de terem uma eficácia relativamente moderada, são mais eficazes para o aquecimento global, depleção de recursos fósseis, acidificação, depleção da camada de ozono e oxidação fotoquímica, onde se obtém uma redução da ordem dos 10 a 11%.

Já para T2 verifica-se que as reduções mais significativas são afins às obtidas para T1, ou seja para o aquecimento global, depleção da camada de ozono, depleção de recursos fósseis, como seria de esperar face às diversas medidas de redução do consumo de energia em 15%. As medidas são porém menos eficazes para a acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e partículas (PM2.5) já que em T2 são influenciadas pela existência do filtro de fluoretos.

#### 4.2.3.4 Comparação e discussão com outros estudos

Conforme já mencionado no capítulo 3 são reduzidos os estudos de ACV encontrados na literatura científica (ver Tabela 6), constando da Tabela 28 o desempenho ambiental alcançado nos estudos que apresentam essa quantificação.

Tabela 28 – Impactes ambientais de telha na Alemanha, Espanha, Itália, Bélgica e Brasil

		Alemanha Gensch e Liu (2008)	Vários (Mateus, 2009)*	Itália Cellura et al. (2011)	Espanha Bribián et al. (2011)	Bélgica (BBF, 2012)	Brasil Souza et al. (2015)
Unidade funcional/referência:		m <sup>2</sup>	kg	kg	kg	kg	Kg **
Tipo de Abordagem		Berço ao portão			Berço ao túmulo		
Cobertura temporal		2006	--	2005	--	--	2010/2011
Categoria de impacte	Unidade						
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,94E+01	8,16E-01	5,78E-02	4,60E-01	3,95E-01	1,29E-01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	4,82E-02	2,90E-03	1,65E-02	--	3,41E-03	7,37E-03
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	4,81E-03	2,85E-04	4,17E-03	--	2,00E-04	--
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	--	8,41E-08	3,60E-08	--	5,12E-08	1,88E-08
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	5,75E-03	1,55E-04	2,22E-04	--	1,70E-04	--
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	3,26E+02	1,46E+01	4,37E+00	4,59E+00	6,75E+00	2,03E+00
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	Kg Sb eq	--	--	--	--	4,19E-07	--

\* dados de inventário: Ecoinvent 2; BBF - Fédération Belge de la Briquerie ; -- dado não disponível ; \*\* convertido para kg de acordo com o artigo 1m<sup>2</sup> = 38,4 kg

De um modo geral verifica-se que as telhas nacionais possuem um melhor desempenho em categorias como a acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e depleção de recursos abióticos elementos (apesar desta última ter sido apenas reportada num estudo). Este comportamento poderá ser justificado pela existência de tecnologias mais avançadas incluindo do ponto de vista ambiental (forno e uso de gás natural), condições de queima eficiente (minimizando COVs), com recurso inclusivé a sistemas de depuração de gases que minimizam gases acidificantes (como os poluentes SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, fluoretos e cloretos) como ocorre na T2. Já o aquecimento global, a depleção de recursos energéticos fósseis e a depleção da camada de ozono atingem melhores desempenhos com a utilização de

biomassa (Cellura et al., 2011; Souza et al., 2015), explicados por a biomassa ser um recurso renovável e ter emissões consideradas nulas de CO<sub>2</sub> durante o seu ciclo de vida, e por outro lado os arrefecimentos do gás natural (utilizado na Alemanha, Bélgica, Espanha e Portugal) recorrerem a substâncias que empobrecem a camada de ozono. Pode-se ainda inferir que o mix elétrico nacional, mais recente e com maior penetração de renováveis, contribui de forma positiva para o desempenho encontrado.

De salientar, no entanto, que em Itália, o estudo de ACV (berço ao portão) efetuado é bastante distinto em termos tecnológicos, por se tratar de telha de fabrico artesanal a biomassa (bagaço de azeitona), situação não representativa do contexto industrial nacional, europeu e mundial, verificando-se consequentemente que o aquecimento global é bastante inferior ao nacional como seria de esperar face ao uso de biomassa na cozedura.

Por outro lado, no Brasil, Souza et al. (2015) efetuaram um estudo de ACV comparativo entre telhas cerâmicas e telhas de cimento para um ciclo de vida de 20 anos, um cenário de distribuição (A4) de 120 km, e perdas durante a instalação (A5) de 1%, mas que não foram consideradas face às regras de corte. Os dados referem-se a 2010/2011, o combustível usado no forno é a biomassa, mas o método de AICV utilizado foi o IMPACT 2002+. Assim, na Tabela 29 apresentam-se os resultados de Souza et al. (2015) e os resultados obtidos para as telhas T1 e T2 com o método IMPACT 2002+ no ano de 2011.

Tabela 29 – Comparação de impactes ambientais por m<sup>2</sup> segundo o IMPACT2002+

Categoria de impacte	Unidades	Telha T1 (2011)	Telha T2 (2011)	Brasil (Souza et al., 2015)
Cancerígenos	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	4,90E-02	6,59E-02	6,10E-02
Não- Cancerígenos	kg C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl eq	3,23E-01	4,12E-01	1,67E-01
Partículas inorgânicas respiráveis	kg PM <sub>2.5</sub> eq	6,13E-03	6,58E-03	1,70E-02
Radiação ionizante	Bq C-14 eq	1,17E+01	1,49E+01	3,90E+01
Depleção da camada de ozono	kg CFC-11 eq	1,50E-06	1,88E-06	7,20E-07
Partículas orgânicas respiráveis	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	6,23E-03	7,07E-03	4,50E-03
Ecotoxicidade aquática	kg TEG água	2,03E+02	2,69E+02	3,08E+02
Ecotoxicidade terrestre	kg TEG solo	0,70E+02	1,04E+02	1,81E+02
Acidificação / nitrificação terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	1,27E-01	1,41E-01	2,83E-01
Ocupação do solo	m <sup>2</sup> org.arável	5,04E-01	4,91E-01	2,77E-01
Acidificação aquática	kg SO <sub>2</sub> eq	3,99E-02	4,03E-02	4,10E-02
Eutrofização aquática	kg PO <sub>4</sub> P-lim	2,77E-04	3,63E-04	6,20E-04
Aquecimento global	kg CO <sub>2</sub> eq	8,88E+00	1,24E+01	4,97E+00
Energia não renovável	MJ primária	1,52E+02	1,92E+02	0,78E+02
Extração mineral	MJ excedente	1,77E-02	2,70E-02	4,50E-02

De uma maneira geral verifica-se que o uso da biomassa nas telhas no Brasil promove menores impactos nas alterações climáticas e no uso de energia não renovável, tal como seria de esperar (fonte renovável com um fator de emissão de CO<sub>2</sub> considerado nulo). A depleção da camada de ozono é também inferior a T1 e T2, como expectável uma vez que para as telhas nacionais este impacto está muito influenciado pelos arrefecimentos do gás natural durante a sua extração e o transporte. O desempenho nacional é porém melhor para as partículas inorgânicas respiráveis (PM<sub>2.5</sub>) uma vez que a biomassa possui cinzas e o gás natural não, bem como para a radiação ionizante, ecotoxicidade, acidificação, extração mineral e eutrofização.

Por outro lado, com a aplicação do IMPACT2002+ verifica-se também que a telha T2 possui impactos superiores a T1, tal como seria de esperar pelas razões já expostas, sendo no entanto a acidificação muito semelhante (uma vez que T2 possui filtro de fluoretos que remove gases ácidos). Já para o uso do solo obteve-se o menor valor para T2, tal como com a aplicação do conjunto de métodos previstos no ILCD.

Finalmente de mencionar que o estudo sobre a ACV de telha cerâmica do Sri Lanka (Kuruppuarachchi et al., 2014), com recurso a biomassa como combustível, não permite efetuar comparações face ao modo de expressão dos resultados.

#### **4.2.4 Conclusão**

Os resultados obtidos para a ACV de telhas produzidas ao longo de uma década com tecnologias distintas (aramada vs mobília refratária) permitem inferir as seguintes ilações:

- melhoria do desempenho ambiental de 2005/2006 para 2014, consequência de menores consumos específicos de energia e da melhoria do mix elétrico nacional, uma vez que processo tecnológico (modo de fabrico e combustível) se manteve. De facto, o impacto ambiental diminuiu para a maioria das categorias (reduções até 23% para T1 e 38% para T2). Esta diminuição de impactos poderá também ser um indiciador da validade das DAPs (5 anos);
- a etapa do berço ao portão (módulos de A1 a A3) é a mais significativa para todas as categorias de impacto exceto para a toxicidade humana não cancerígena e ecotoxicidade, onde o transporte do produto final (A4) assume a posição mais relevante. O transporte (A4) representa para a grande maioria das categorias a segunda mais relevante. As restantes etapas/módulos (A5, B e C) são insignificantes para a maioria das categorias, exceto partículas (PM<sub>2.5</sub>) no fim de vida;
- a tecnologia com refratário (T2) apresenta maiores impactos que a tecnologia com arame (T1), associado principalmente ao consumo energético adicional do material refratário na etapa A1-A3 (e consequentes emissões), exceto para a depleção de



recursos elementos, toxicidade humana e acidificação (por T2 possuir filtro de fluoretos e não pelo uso de refratário). Para o uso do solo por unidade declarada T1 é maior face à maior utilização de paletes, ao espaço e lay-out antigo de T1 (e não associado à tecnologia). Adicionalmente a telha T2 possui um maior peso específico agravando os impactes por unidade funcional ( $m^2$ );

- a “produção de embalagem” é o processo dominante para o uso do solo, toxicidade humana cancerígena, depleção de recursos abióticos (apenas para T1); a “produção de combustíveis” é o maior contribuinte para a depleção de recursos fósseis, a depleção da camada de ozono e a oxidação fotoquímica (ILCD); a “produção da eletricidade” é o processo dominante para a depleção da água e acidificação (apenas para T2); as “atividades na fábrica” contribuem maioritariamente para o aquecimento global, partículas (PM<sub>2.5</sub>); e ainda para a oxidação fotoquímica (CML-IA) (T1), acidificação (T1) e; finalmente o “transporte” é relevante para a ecotoxicidade e toxicidade não cancerígena (T2);
- as infraestruturas têm pouca relevância para a maioria das categorias de impacto (em regra inferior a 10%), no entanto podem ser significativas para a depleção de recursos abióticos, uso do solo e ainda a toxicidade humana - efeito cancerígeno e não cancerígeno.

### **4.3 Ladrilhos Cerâmicos - pavimento**

Este capítulo é dedicado ao estudo de caso da ACV do pavimento cerâmico. A descrição do produto é no entanto comum ao pavimento e ao revestimento, ou seja é efetuada para o ladrilho cerâmico que pode ter a função de pavimento e/ou de revestimento, atendendo a que quer em termos de norma de produto de referência quer em termos estatísticos aparecem sempre agregados. Adiante efetua-se a separação dos dois estudos de caso de ACV em capítulos distintos atendendo às especificidades e à função dos materiais, particularmente do revestimento.

#### **4.3.1 Descrição do produto – ladrilho cerâmico**

Neste item são descritas as principais características dos ladrilhos cerâmicos que podem ter a função de pavimento e/ou de revestimento. Os ladrilhos cerâmicos (placas feitas de argila e/ou outras matérias-primas inorgânicas) são em geral utilizados como revestimento para pavimentos e paredes. Usualmente são conformados por extrusão (método A) ou prensagem a seco (método B) à temperatura ambiente, sendo em seguida secos e subsequentemente cozidos a temperaturas suficientes para o desenvolvimento das propriedades requeridas, podendo no entanto serem conformados por outros processos.

Os ladrilhos cerâmicos consistem essencialmente num corpo cerâmico (97 a 100%) e opcionalmente uma camada de vidrado (2 a 3 %). Assim, os ladrilhos cerâmicos podem ser vidrados (GL - glazed) ou não vidrados (UGL - unglazed). Um ladrilho totalmente vitrificado (ou porcelanato) é um ladrilho com absorção de água inferior a 0,5%, segundo a EN 14411:2016 (CEN, 2016).

Os pavimentos cerâmicos considerados neste estudo pertencem ao Grupo Ala, Bla, Blb e Blla, de acordo com a norma europeia EN 14411:2016 (CEN, 2016). Além disso, cumprem os requisitos do Regulamento dos Produtos de Construção (Comissão Europeia, 2011b) em termos de resistência mecânica e estabilidade, segurança em caso de incêndio, higiene e saúde, segurança no uso, proteção contra o ruído e retenção de calor. Em termos internacionais existe a norma ISO 13006:2018 (ISO, 2018) que substituiu a anterior versão de 2012.

#### **4.3.2 Metodologia de ACV aplicada ao pavimento cerâmico**

A metodologia de ACV é a mesma em todos os estudos de caso, ou seja de acordo com a ISO 14040:2006 e a ISO 14044:2006 (ISO, 2006a, 2006b), com etapas modulares alinhando a terminologia com a norma EN 15804+A1:2013 (CEN, 2013).

##### **4.3.2.1 Definição de objetivo e âmbito**

Este estudo pretende identificar e avaliar os impactos ambientais associados ao longo do ciclo de vida de pavimento cerâmico produzido em Portugal a partir de argilas, caulinos,

feldspatos e corantes, entre outros. Foram considerados dez estudos de caso representativos dos seguintes materiais cerâmicos de pavimento:

- grés porcelânico ou porcelanato por prensagem (ladrilhos PC1 a PC3 e PP4), em ciclo completo ou parcial, pertencentes ao grupo BIa segundo a EN14411:2016 (CEN, 2016);
- grés porcelânico ou porcelanato extrudido, em ciclo parcial, do grupo AIa (PE5), segundo a EN14411:2016 (CEN, 2016);
- pavimento de grés em pasta branca conformado por prensagem (ladrilho BC6, BC7, BP8 e BP9), em ciclo completo ou parcial, grupo BIb segundo a EN 14411:2016 (CEN, 2016);
- pavimento em base vermelha, conformado por prensagem em ciclo completo (ladrilho VC10), grupo BIIa, segundo a EN14411:2016 (CEN, 2016).

De mencionar que a designação destas amostras teve em conta que a primeira letra significa o tipo de material (grés porcelânico = P, grés em pasta branca = B, pavimento em pasta vermelha = V); a segunda letra reflete a tecnologia de fabrico por prensagem em ciclo completo (C) ou ciclo parcial (P), ou a conformação por extrusão em ciclo parcial (E), seguida de numeração sequencial.

Neste contexto, foram consideradas as duas opções de fabrico: o ciclo completo (todas as operações desenvolvidas na unidade industrial – “C”) e o ciclo parcial (o processo de preparação da pasta cerâmica, incluindo a atomização executada noutra unidade industrial especializada para esse efeito – “P”). A disponibilidade de matérias-primas preparadas para pastas (pó atomizado) e vidros, produzidos por fornecedores especializados, tem sido um fator determinante na tendência para a desintegração vertical das atividades de preparação de matérias-primas. Esta opção depende, para além das considerações de natureza técnica e tecnológica, de considerações de natureza económica e estratégica.

A preparação de pasta no exterior foi também alvo de ACV com recurso a dados específicos do fornecedor de pasta em uso (PP4, PE5, BP8 e BP9). De mencionar que a fábrica onde se produz a amostra BC6 é a única mista ou seja apesar de estar dotada de secção de preparação de pasta, por opção de mercado e face a uma diversidade de produtos que pretende ter, adquire também pasta de pavimento de grés branca a uma empresa da especialidade no exterior (cerca de 20%), pelo que foi agrupada nas de ciclo completo.

Estes estudos de caso são representativos do pavimento cerâmico produzido em Portugal, mas também na Europa e no mundo, quer em termos da capacidade instalada, tipo de cozedura (monocozedura), dimensões do forno e tecnologia usada na conformação (técnica de prensagem e técnica de extrusão, esta última muito menos frequente em Portugal e no mundo), quer em termos do combustível usado (o gás natural é o único

combustível utilizado em Portugal neste subsector, embora a nível mundial este seja também o principal combustível usado poderão existir outros como seja o GPL).

Em termos de objetivos específicos com esta ACV pretende-se:

- a) identificar e avaliar impactes ambientais ao longo de ciclo de vida de pavimento cerâmico produzido em Portugal, comparando-os com trabalhos existentes;
- b) verificar se existem diferenças significativas de impactes ambientais, em função das diferentes tipologias de materiais (grés porcelânico por prensagem, grés porcelânico por extrusão, pavimento de grés em pasta branca por prensagem e pavimento em pasta vermelha por prensagem);
- c) avaliar a influência nos impactes ambientais das opções tecnológicas de ciclo completo e de ciclo parcial;
- d) quantificar categorias de impacto ambiental adicionais às previstas na norma EN 15804+A1:2013 (CEN, 2013) sobre RCP de produtos de construção no âmbito de DAP, atendendo ao conjunto limitado de categorias previstas naquela norma;
- e) indagar a influência dos métodos de AICV (CML-IA e ILCD) nos resultados obtidos para a acidificação e oxidação fotoquímica;
- f) relacionar os valores por unidade funcional ( $m^2$ ) e por unidade declarada (kg), investigando a influência da espessura do material nos resultados;
- g) identificar áreas de melhoria de desempenho ambiental e medidas de redução desses impactes, nomeadamente implementando alguns dos instrumentos presentemente disponíveis para o sector (ex. rotulagem ecológica, MTDs), verificando a sua eficácia em termos de redução de impactes;
- h) perceber a influência que as infraestruturas (construção de edifícios fabris, maquinaria, equipamentos, etc.) poderão ter nos resultados da abordagem do berço ao portão (A1-A3).

#### **4.3.2.2 Unidade funcional**

A unidade funcional definida neste estudo é  $1 m^2$  de pavimento produzido em Portugal, fabricado e disponível para ser expedido para o cliente, para revestir o pavimento do interior de um edifício num período de 50 anos (baseado na EN 14411:2016 (CEN, 2016)). Esta unidade funcional está alinhada com a maioria dos estudos científicos mencionados no capítulo 3.2.3 desta tese (Almeida et al., 2016b; Benveniste et al., 2011; Bovea et al., 2010; Ibáñez-Forés et al., 2011, 2013; Nicoletti et al., 2002; Quinteiro et al., 2014; Tikul and Srichandr, 2010) e outros estudos disponíveis no mercado como sejam as DAPs.

Os resultados serão adicionalmente expressos em quilograma (assumida como unidade declarada), uma vez que a tipologia de produtos difere em termos de peso específico (função da espessura) do material, e pretende-se averiguar a influência deste parâmetro (análise de sensibilidade). Na Tabela 30 apresenta-se o peso específico em cozido associado a cada um dos dez estudos de caso de pavimento cerâmico.

*Tabela 30 – Peso específico do material de pavimento cerâmico*

<b>Peso específico em cozido</b>	<b>Amostra:</b>	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PP4</b>	<b>PE5</b>
	kg/m <sup>2</sup>	21,0	23,2	21,1	22,5	22,0
	<b>Amostra:</b>	<b>BC6</b>	<b>BC7</b>	<b>BP8</b>	<b>BP9</b>	<b>VC10</b>
	kg/m <sup>2</sup>	18,0	21,0	17,5	16,0	16,8

Conforme se pode verificar, as amostras de grés porcelânico possuem um peso específico superior às restantes.

#### **4.3.2.3 Fronteiras do sistema**

As fronteiras do sistema foram definidas tendo por base o modelo de etapas e módulos estabelecido na EN 15804+A1:2013 (CEN, 2013) e incluem:

- A1 - extração e processamento de matérias-primas e auxiliares;
- A2- transporte de matérias-primas e auxiliares;
- A3 - produção do ladrilho cerâmico na fábrica;
- A4 - distribuição do ladrilho;
- A5 - processo de instalação do ladrilho cerâmico, com o consequente uso de fixativo (cimento-cola);
- B - etapa de uso/utilização do ladrilho que inclui sempre que aplicável a utilização (lavagem com água e detergente), manutenção, reparação, substituição e reabilitação;
- C - etapa de fim de vida do ladrilho (inclui a desconstrução e demolição, transporte, processamento dos resíduos e eliminação final).

Foram excluídas das fronteiras do sistema, a produção e manutenção de bens de capital, tais como edifícios, maquinaria, equipamentos, etc. No entanto, e de forma a perceber o impacto que estas poderão ter, numa análise de sensibilidade apresentam-se os impactos que estas infraestruturas poderão ter nos resultados da abordagem do “berço ao portão” (A1-A3), considerando os dados de inventário contidos na base de dados ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).

Neste contexto são avaliadas todas as etapas do ciclo de vida, isto é segue-se uma abordagem do “berço ao túmulo” (“cradle-to-grave”), conforme Figura 75.

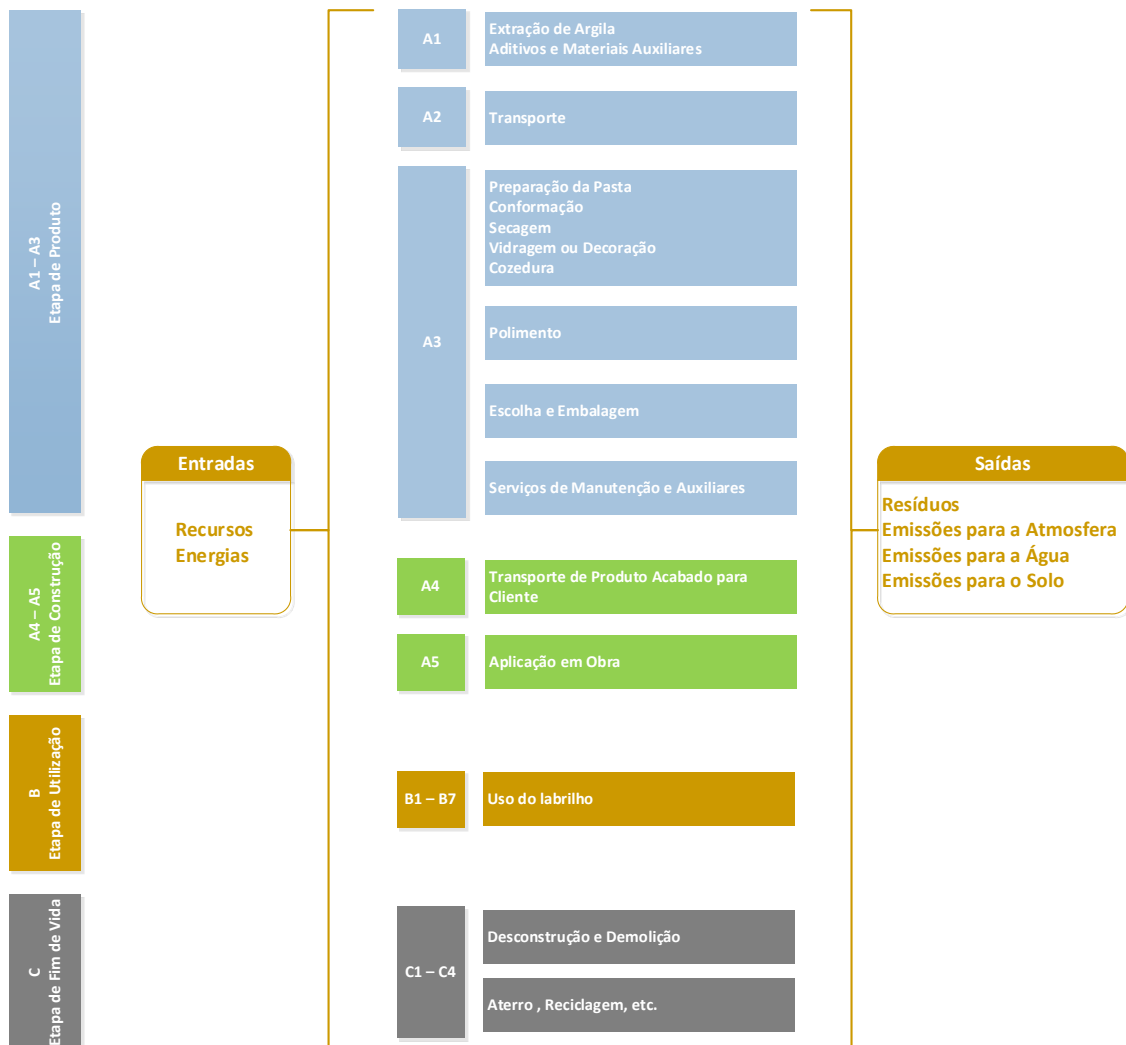


Figura 75 – Fronteiras do sistema de ladrilho cerâmico

Em termos mais detalhados as fronteiras do sistema incluem:

A etapa A1 engloba quer a extração e processamento de recursos naturais como argilas, caulinos, feldspatos, dolomite, carbonatos e areias em pedreiras; quer a aquisição (após processamento) de corantes, tintas, fritas, vidros, engobes, e outros aditivos para a fase de decoração do material.

De mencionar que os recursos geológicos são extraídos mecanicamente de acordo com um plano de pedreira, que inclui o plano de lavra e ainda o plano ambiental e de recuperação paisagística, podendo posteriormente, sofrer operações de beneficiamento como lavagem, crivagem, loteamento e, seguidamente são enviados para as unidades industriais, que se podem situar a longas distâncias.

Os vidrados (ou vidros cerâmicos) utilizados podem ser formados por composições que integrem parcialmente alguns dos materiais acima mencionados, combinados com fritas (materiais vítreos de composição estudada que são obtidos por fusão e arrefecimento rápido, via vazamento da composição em fusão em água a temperatura ambiente), óxidos metálicos e agentes de dispersão e de coloração.

Os engobes são normalmente camadas intermédias entre a pasta e os vidrados que são adicionados para diminuir os efeitos da diferença de características químicas e físicas entre as pastas e os vidrados, como sejam o coeficiente de dilatação. Normalmente têm composições intermédias entre as da pasta e as do vidrado sendo obtidos por misturas balanceadas destas duas matrizes, ou seja são normalmente compostos por mistura da pasta base com a frita base de suporte ao vidrado e outros elementos chave deste.

Os vidros e engobes são maioritariamente fabricados por empresas especializadas, que os fornecem, em pó ou em papa, a empresas produtoras dos ladrilhos cerâmicos.

Esta etapa incluiu ainda a produção de eletricidade a partir das fontes nacionais (mix português) incluindo a sua extração, processamento e transporte.

A etapa A2 refere-se ao transporte das matérias-primas e auxiliares para a unidade fabril.

O processo de fabrico (A3 - produção) inclui várias etapas:

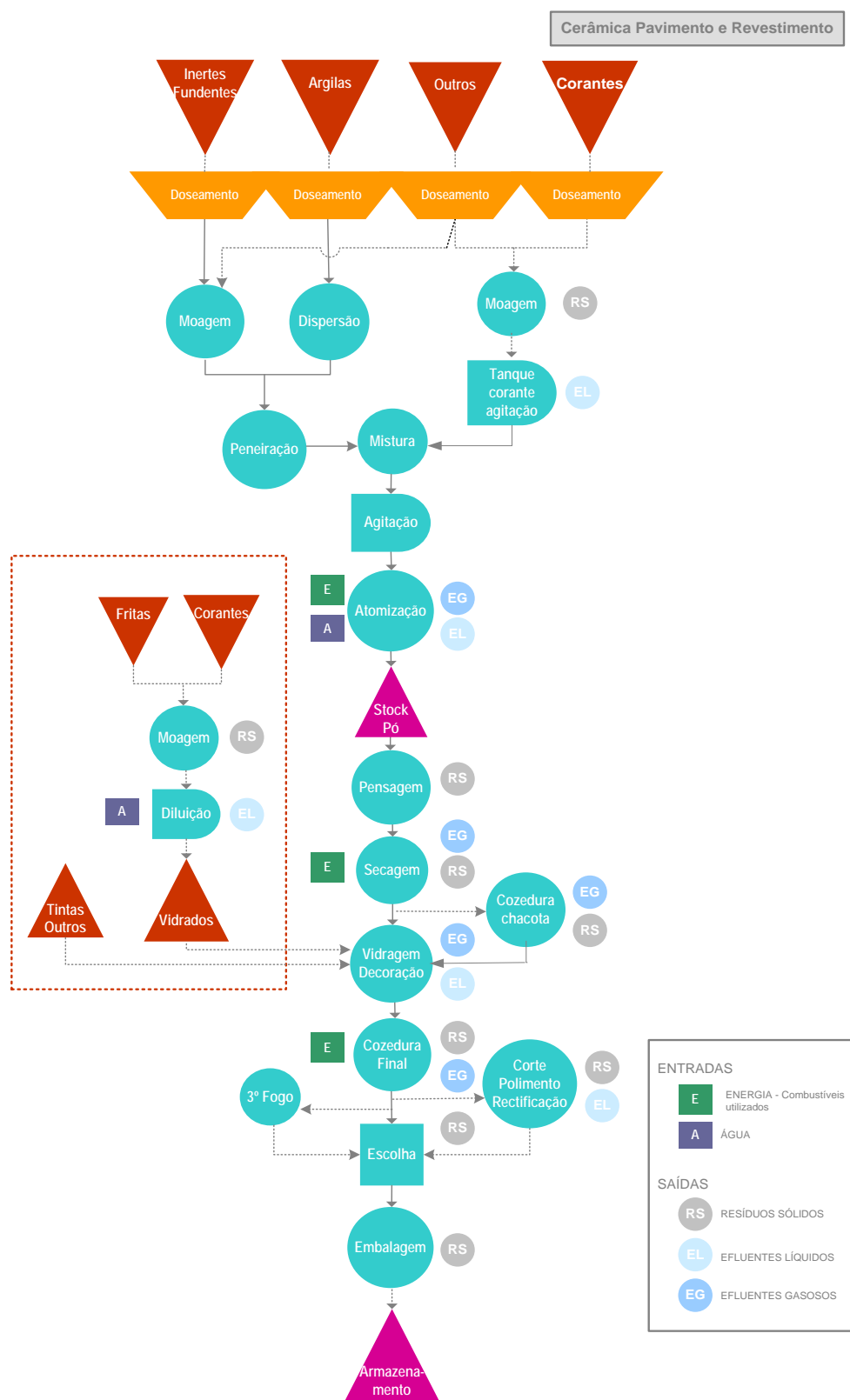
- preparação de matérias-primas - processamento das diversas matérias-primas (ex. moagem) de forma a obter uma pasta plástica em suspensão ou barbotina, sendo depois peneirada e filtrada e seguidamente bombada para o atomizador. A pasta é atomizada (sujeita a uma operação de secagem num atomizador, equipamento alimentado, em regra, a gás natural) para obtenção do pó para prensagem. O pó atomizado é recolhido no fundo do atomizador e o pó mais fino, arrastado pelo ar de exaustão, é recuperado num sistema de separação por ciclones e/ou lavagem a húmido. Este processo pode ser realizado numa fábrica exterior dedicada exclusivamente à preparação de pastas como é o caso das fábricas em ciclo parcial (PP4, PE5, BP8 e BP9). No presente trabalho as empresas que fabricam PC1, PC2, PC3, BC6, BC7 e VC10, apresentam esta secção de preparação de matérias-primas e as restantes encontram-se em ciclo parcial. A BC6 também adquire parte da pasta já preparada (pó atomizado) a fornecedor externo, conforme já mencionado;
- conformação – pode ser utilizada a técnica de prensagem (mais comum em Portugal, Europa e no mundo utilizando prensas automáticas de alta pressão e com controlo de velocidade) ou por técnica de extrusão (numa fieira ou extrusora), usando uma pasta mais plástica. Os pavimentos em estudo são conformados por prensagem, exceto PE5 que é por extrusão. As peças após conformação são automaticamente carregados nos secadores para o processo subsequente de secagem;

- secagem - remoção de humidade dos ladrilhos cerâmicos, em secadores verticais (mais usuais, e que operam a temperaturas máximas que podem atingir os 180-220 °C e são alimentados a gás natural) e secadores horizontais (menos utilizados, mas que começam a emergir face à melhoria energética e a menores temperaturas que rondam os 160-190 °C);
- vidragem – consiste na colocação de uma camada ou revestimento de uma substância vítrea para colorir, decorar, fortalecer ou impermeabilizar o pavimento cerâmico. Pode ser efetuada por diversas tipologias de equipamentos como campânulas, impressão por rolos (“rotocolor”), cabines de vidrar e mais recentemente por impressora digital (que acaba por poupar imensa água e o próprio vidro é utilizado de um modo mais racional);
- cozedura – consiste na passagem dos ladrilhos cerâmicos através de fornos de rolos de baixa inércia térmica para aquecimento intenso (cozedura) a cerca de 1100-1250 °C para aumentar a resistência e alcançar a porosidade e outras características físicas desejadas para o produto final. Todos os fornos dos estudos de caso utilizam o gás natural como combustível;
- tratamento de superfície – é uma fase opcional e inclui polimento (submetido a desgaste por fricção de abrasivos) e/ou retificação do pavimento cerâmico;
- embalagem – para esta operação recorre-se a caixas de cartão, plástico retrátil e/ou filme plástico e paletes de madeira. Finalmente o material é armazenado e expedido.

Este módulo de produção (A3) incluiu ainda as operações de manutenção desenvolvidas na fábrica, bem como sistemas de tratamento de águas residuais e sistemas de tratamento de efluentes gasosos dos fornos (sistemas de adsorção em leitos de brita calcária para precipitar os ácidos fluorídrico e clorídrico presentes nas emissões gasosas, bem como de forma residual o dióxido de enxofre). Relativamente a estes últimos verifica-se que a maioria destes sistemas de fim de linha opera por cascata com brita calcária (PC1, PC2, PC3, PP4, PE5, BC7, BP8) e apenas um por injeção de carbonato de cálcio em pó na linha de tratamento e depois passagem num filtro de mangas para retenção de poeiras precipitadas (BC6). De notar que dois (BP9 e VC10) não dispõem de qualquer tipo de sistema de tratamento para os efluentes gasosos do forno. De mencionar que o flúor é um contaminante natural de origem mineral que resulta da existência de iões fluoreto ( $F^-$ ) na estrutura dos minerais argilosos, substituindo iões hidroxilo ( $OH^-$ ), devido a terem tamanhos similares (Almeida et al., 2001). Todas as instalações dispõem de sistemas de despoeiramento com filtros de manga para as operações de receção e/ou preparação de matérias-primas e conformação.



Na Figura 76 consta o fluxograma de fabrico do ladrilho cerâmico onde se pode visualizar os principais aspetos ambientais associados.



*Figura 76 – Fluxograma de fabrico do ladrilho cerâmico com identificação de principais aspetos ambientais*

A etapa de produto (A1-A3) inclui ainda a produção da embalagem (cartão, filme plástico, cinta plástica e paletes de madeira) e a produção de combustíveis (gás natural, gasóleo e em alguns estudos de caso o GPL). De mencionar que o gás natural é o único combustível usado nos processos térmicos de fabrico, que é aliás a melhor técnica disponível (MTD) para este subsector de acordo com o documento de referência para a indústria cerâmica (European Commission, 2007). Já o gasóleo é usado em alguns transportes no interior da fábrica e nos geradores de emergência (utilizado apenas em caso de falha de energia elétrica), representando assim uma pequena parte do consumo global de energia (1 a 2%) face ao consumo de gás natural que representa 98-99%. O GPL pode ser utilizado nos empilhadores mas também em garrafas na operação de embalagem (particularmente para efetuar as designadas meias paletes). Neste contexto, existem estudos de caso, como se verá adiante, cujo consumo de gasóleo e GPL é muito diminuto, por terem sistemas de movimentação elétricos.

A etapa de construção inclui os módulos A4 e A5. O módulo A4 inclui o transporte das peças de pavimento cerâmico para os centros de distribuição e o respetivo transporte para o local de construção (obra). Neste caso, foi aplicado um cenário de transporte por camião, classe EURO 4, por estrada para uma distância total de 1000 km, considerando uma distância média para a França (destino representativo e significativo para o pavimento cerâmico produzido em Portugal).

O módulo A5 inclui a instalação de ladrilhos cerâmicos no edifício utilizando cimento cola. Foi utilizada a quantidade de 3,5 kg de cimento para cada 1 m<sup>2</sup> de ladrilho de acordo com as especificações de colagem simples para talocha denteada, segundo as recomendações dos principais fabricantes nacionais (SECIL, 2017; WEBER, 2016) e perdas de ladrilho cerâmico em obra de cerca de 3%.

A etapa B inclui a utilização do pavimento cerâmico após a sua instalação e as operações de limpeza / manutenção com o uso de detergente, uma vez por semana, o que correspondeu a um consumo de detergente de 0,39 kg/m<sup>2</sup> (durante o ciclo de vida) baseado em dados de bibliografia (Ros-Dosdá et al., 2010).

A etapa C refere-se ao fim de vida do pavimento cerâmico, com destaque para os resíduos de demolição e construção gerados, mas também à energia despendida nas operações de demolição. Esta tipologia de resíduos pode ser reutilizada em obra, para efetuar fundações embora no presente estudo o cenário utilizado tenha sido a deposição em aterro (“pior cenário”), para todos os ladrilhos em estudo.

### 4.3.2.4 Inventário do ciclo de vida

Os dados associados às etapas de extração e fornecimento de materiais (A1), transporte de recursos para a unidade de produção (A2) e produção do pavimento cerâmico (A3) foram recolhidos junto dos fabricantes através de uma ficha de recolha de dados e são representativos do ano de 2015. Foi efetuada uma validação de dados que incluiu balanços de massa, comparação com fatores de emissão disponibilizados no documento de referência BREF CER (European Commission, 2007) e com os dados mais relevantes de anos anteriores como 2012 e 2014. A experiência recolhida ao longo dos trabalhos desta tese, nomeadamente os artigos publicados nesta área (Almeida et al., 2016a, 2014b, 2013b, 2011a, 2010b) foi também utilizada para validar a coerência, representatividade e precisão destes dados.

Os dados de desempenho ambiental das emissões foram recolhidos através dos relatórios oficiais como medições de efluentes gasosos em fontes fixas (efetuadas por laboratório acreditado segundo a norma NP EN ISO 17025 (IPQ, 2005), boletins de análise de caracterização de efluentes líquidos, consumos energéticos, dados de geração de resíduos), representativos do ano de 2015.

Os resíduos gerados internamente como sejam os materiais antes do processamento térmico (ex. as poeiras recolhidas em sistemas de despoeiramento, caco crú, peças secas partidas – caco seco) são modeladas como reciclagem em ciclo fechado.

Quando não foi possível obter dados primários, foi usada a última versão da base de dados do Ecoinvent 3 (v 3.3) (Ecoinvent, 2014) nomeadamente para dados de processos de segundo plano (“background data”). Estes dados secundários incluem a produção de eletricidade, combustíveis, materiais de embalagem (cartão, plástico, paletes de madeira, etc.), materiais de manutenção (ex. óleo lubrificante, componentes metálicos, gases de soldadura), detergente (usado na etapa de utilização), vidrados, caulinos, magnesite, bem como os fatores de emissão para o transporte e destino final. Para a eletricidade e o gás natural foi adequado o processo da base de dados “Ecoinvent” ao mix real verificado no ano de 2015 em Portugal, de acordo com dados da DGEG (DGEG, 2017) e do IEA (IEA, 2016).

Foi aplicada uma regra de corte de 0,5% (em massa) aos fluxos de entrada e saída, exceto quando se utilizam substâncias perigosas.

A Tabela 31 apresenta de forma resumida as diversas fontes de informação utilizadas na recolha de dados de inventário para os ladrilhos cerâmicos selecionados e fabricados nas diversas empresas localizadas em Portugal.

Tabela 31 – Fontes de dados utilizados para a fase de recolha de inventário do ladrilho

Etapa	Módulo	Descrição de dados	Fonte de dados
Extração de matérias primas	A1	Entradas e saídas	Indústria extrativa portuguesa Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).
Processamento de materiais auxiliares	A1	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).
Transporte de materiais para a fábrica de pavimento	A2	Distância, modo de transporte, tipo de combustível	Indústria extrativa portuguesa e fábricas de produção de ladrilhos nacionais para quantificar a carga, energia requerida, modo de transporte e tipo de combustível. Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014) para os fatores de emissão, para camião EURO 4.
Fábrica de ladrilho	A3	Entradas e saídas	Fábricas de ladrilhos, representativas da tipologia de produção e das tecnologias nacionais. Consulta de faturas, contadores, registos, boletins de análise de parâmetros ambientais, PRTR, MIRR.
Transporte para o local de construção	A4	Distância, modo de transporte, tipo de combustível	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014) para camião com atrelado, classe EURO 4.
Produção de fixativo (cimento-cola)	A5	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014). Dados nacionais (Couto, 2011).
Instalação do pavimento na obra de construção com o fixativo (cimento-cola)	A5	Entradas e saídas	Fichas técnicas da Weber (WEBER, 2016) e Secil (SECIL, 2017).
Produção da eletricidade em 2015 (Portuguese mix)	A1, A3, A5	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014) adaptada para o mix de 2014 segundo dados oficiais disponíveis na internet (IEA, 2016)
Produção de combustível	A1 a A4, C1-C4.	Entradas e saídas	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014), adaptada ao mix nacional no caso do gás natural (DGEG, 2017)
Etapa de uso	B1-B5	Entradas e saídas	Lavagem do piso uma vez por semana de forma manual (Ros-Dosdá et al., 2010). Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014)
Fim de vida (desconstrução)	C1	Entradas e saídas, incluindo o gásóleo consumido na desconstrução	Base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014)

Os dados de inventário de entrada e de saída para o módulo de produção (A3) de 1 m<sup>2</sup> de ladrilho (pavimento cerâmico) constam da Tabela 32 e da Tabela 33 respetivamente. Já na Tabela 34 consta a distribuição percentual do consumo de gás natural no processo produtivo (grandes consumidores) e na fábrica de pavimento (etapa A3).

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela 32 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m<sup>2</sup> de pavimento (entradas)

Entradas	Unidades	PC1	PC2	PC3	PP4	PE5	BC6	BC7	BP8	BP9	VC10
Argilas	kg	7,40E+00	5,94E+00	6,90E+00	--	--	6,50E+00	1,18E+01	--	--	1,70E+01
Bentonite	kg	--	--	--	--	--	--	3,97E-04	--	--	--
Caulino	kg	4,70E+00	5,60E+00	4,14E+00	--	--	1,63E-03	4,98E-02	--	--	2,21E-04
Calcário	kg	--	1,41E-01	8,00E-02	1,73E-01	1,00E-01	--	1,62E-02	6,00E-02	1,00E-03	1,61E-04
Dolomite	kg	--	2,79E-02	--	--	--	--	--	--	--	--
Feldspato	kg	9,00E+00	1,02E+01	8,86E+00	--	--	1,73E+00	6,50E+00	--	--	--
Perlite	kg	2,10E-01	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Talco	kg	1,42E-01	--	2,11E-01	--	--	1,02E-01	3,34E-01	--	--	--
Corante	kg	4,10E-01	2,00E-02	--	--	1,30E-02	8,10E-02	1,50E-02	--	--	--
Vidros	kg	--	2,34E-01	3,90E-01	5,47E-01	6,10E-02	6,00E-01	5,90E-01	6,83E-01	5,87E-01	8,50E-01
Aditivos	kg	3,35E-02	3,70E-04	--	--	--	9,10E-02	5,60E-03	--	--	--
Silicato de sódio	kg	2,23E-02	3,56E-02	--	--	--	1,10E-03	1,10E-04	--	--	1,01E-03
Areia	kg	--	1,16E+00	1,50E+00	--	--	3,27E-03	1,34E-01	--	--	1,00E-04
Pó atomizado	kg	--	--	--	2,27E+01	2,25E+01	7,70E+00	--	1,77E+01	1,64E+01	--
Resíduos e subprodutos (ex. caco crú, poeiras)	kg	1,00E+00	1,30E+00	1,00E+00	--	--	2,60E+00	3,00E+00	--	--	1,00E+00
Refratário	kg	n.d.	2,91E-02	2,50E-03	3,04E-03	n.d.	n.d.	n.d.	4,00E-04	n.d.	n.d.
Água consumida (furo)	l	1,21E+01	1,32E+01	3,53E+01	4,05E+00	4,00E+00	8,34E+00	1,13E+01	2,20E+01	1,60E+01	2,85E+01
Eletricidade	kWh	5,34E+00	7,10E+00	4,74E+00	2,17E+00	3,67E+00	4,05E+00	4,94E+00	2,88E+00	1,33E+00	3,70E+00
Gás natural	GJ	1,15E-01	1,24E-01	1,10E-01	8,40E-02	1,09E-01	9,39E-02	8,94E-02	6,20E-02	6,00E-02	1,02E-01
Gasóleo	MJ	1,40E+00	1,07E+00	3,00E-02	1,51E+00	1,50E+00	7,11E-01	6,64E-01	2,74E+00	5,00E-01	4,10E-01
Gás propano liquefeito	kg	--	1,30E-03	9,20E-04	--	--	--	1,08E-02	1,07E-04	--	5,40E-03

Tabela 32 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m<sup>2</sup> de pavimento (entradas) (continuação)

Entradas	Unidades	PC1	PC2	PC3	PP4	PE5	BC6	BC7	BP8	BP9	VC10
Material de embalagem: cartão	kg	1,44E-02	2,39E-01	2,50E-01	1,30E-01	2,03E-01	1,50E-02	9,52E-02	1,28E-01	3,00E-01	2,00E-02
Material de embalagem: filme plástico	kg	1,87E-01	2,17E-02	2,50E-02	2,79E-02	3,06E-02	1,50E-03	1,31E-02	4,15E-02	5,00E-02	1,50E-03
Material de embalagem: cinta	kg	1,30E-03	1,00E-04	--	3,11E-03	1,39E-03	3,87E-03	4,89E-04	3,87E-03	4,00E-03	4,00E-04
Material de embalagem: madeira	Número	1,29E-02	2,00E-02	2,70E-02	2,69E-02	2,57E-02	1,93E-02	1,04E-02	1,93E-02	2,80E-02	1,91E-02
<i>Materiais de manutenção:</i> Acetileno	kg	9,63E-05	1,10E-05	6,00E-05	9,47E-05	1,37E-04	n.d.	3,48E-05	2,58E-03	6,00E-05	1,66E-05
<i>Materiais de manutenção:</i> Oxigénio	kg	1,02E-04	1,20E-05	2,00E-05	1,57E-04	1,53E-04	n.d.	3,63E-05	2,00E-05	2,00E-05	1,63E-05
<i>Materiais de manutenção:</i> Óleo de lubrificação	kg	5,29E-03	4,62E-03	4,00E-03	7,51E-04	1,61E-04	n.d.	6,72E-03	2,58E-03	2,00E-03	1,88E-03
<i>Transportes de matérias-primas, auxiliares e embalagem:</i>											
Transporte: barco	tkm	2,98E+01	3,40E+01	1,50E+01	--	--	1,12E+00	4,57E+01	--	--	--
Transporte: camião 16-32 t	tkm	6,68E+00	9,12E+00	1,01E+01	4,22E+00	3,89E+00	8,39E+00	1,05E+01	3,10E+00	4,18E+00	3,21E+00
Transporte: comboio	tkm	6,00E-02	--	1,00E-02	1,00E-02	1,00E-02	--	6,00E-01	1,00E-02	1,00E-02	1,12E+01

n.d. – não disponível (dado não medido ou não disponibilizado pela empresa); --não aplicável

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela 33 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m<sup>2</sup> de pavimento (“saídas”)

Saídas	Unidades	PC1	PC2	PC3	PP4	PE5	BC6	BC7	BP8	BP9	VC10
<i>Emissões para o ar:</i>											
PM<10	kg	4,54E-03	5,28E-03	4,52E-03	2,22E-03	6,71E-04	2,53E-03	5,82E-03	1,45E-03	5,19E-05	1,85E-05
PM>10	kg	1,51E-03	9,31E-04	7,98E-04	3,93E-04	1,18E-04	8,38E-04	1,94E-03	2,55E-04	9,15E-06	3,27E-04
CO <sub>2</sub>	kg	6,66E+00	7,19E+00	6,46E+00	5,70E+00	6,78E+00	6,06E+00	5,91E+00	4,48E+00	3,93E+00	6,10E+00
HF	kg	2,01E-03	5,30E-04	3,30E-04	1,15E-05	6,60E-05	1,13E-03	8,08E-04	2,36E-05	9,54E-05	1,72E-04
HCl	kg	7,23E-05	4,29E-04	2,31E-04	3,82E-05	9,14E-04	1,17E-03	3,80E-04	5,18E-05	1,47E-03	5,02E-04
CO	kg	5,39E-03	1,58E-02	7,83E-03	1,17E-02	1,66E-02	7,16E-03	1,14E-02	1,27E-02	2,67E-04	8,66E-03
NO <sub>x</sub>	kg	4,13E-03	3,78E-03	6,31E-03	6,02E-03	7,58E-03	2,63E-03	3,26E-03	6,27E-03	1,26E-03	8,22E-03
COVNM	kg	8,54E-04	5,67E-04	2,09E-03	8,75E-04	1,25E-02	1,20E-03	1,22E-03	7,07E-04	1,67E-04	1,74E-03
SO <sub>x</sub>	kg	2,50E-05	2,00E-03	2,59E-05	5,51E-03	2,67E-05	1,95E-03	7,20E-04	2,15E-04	6,02E-03	4,84E-04
Cd	kg	5,82E-06	1,61E-07	1,65E-06	3,21E-07	2,23E-07	1,48E-07	4,82E-07	4,79E-07	1,22E-06	1,34E-07
Cr	kg	3,63E-06	5,61E-05	2,77E-07	4,97E-07	2,02E-04	4,45E-07	6,67E-06	2,07E-05	2,38E-07	6,24E-07
Ni	kg	5,82E-06	2,76E-05	1,50E-06	1,15E-06	1,57E-05	5,57E-06	2,96E-06	1,32E-05	1,00E-06	1,25E-06
Pb	kg	4,13E-06	3,50E-06	3,72E-07	1,35E-05	3,31E-05	2,18E-05	3,00E-05	7,70E-06	1,00E-05	3,88E-05
Zn	kg	4,76E-04	1,46E-06	4,89E-06	7,57E-06	3,49E-05	6,85E-06	1,18E-06	8,01E-06	1,00E-06	1,74E-05
Cu	kg	4,86E-04	4,71E-08	3,64E-08	3,41E-06	3,75E-08	3,13E-08	n.d.	1,07E-06	1,79E-08	3,57E-07
As	kg	3,00E-09	1,50E-08	8,56E-09	5,68E-09	8,81E-09	4,33E-09	n.d.	1,62E-08	2,39E-08	2,61E-08
Hg	kg	n.d.	8,83E-08	1,11E-08	5,68E-09	1,15E-09	5,62E-10	n.d.	5,37E-09	8,17E-09	6,30E-09
<i>Emissões para a água</i>											
Sólidos suspensos	kg	--	1,19E-04	--	1,49E-04	--	--	2,57E-04	4,27E-04	1,47E-04	9,21E-05
Carência bioquímica de oxigénio (CBO5)	kg	--	3,21E-04	--	7,46E-05	--	--	9,39E-05	2,14E-04	1,24E-04	0,00E+00

Tabela 33 – Dados de inventário para a produção (A3) de 1 m<sup>2</sup> de pavimento (“saídas”) (continuação)

Saídas	Unidades	PC1	PC2	PC3	PP4	PE5	BC6	BC7	BP8	BP9	VC10
Carência química de oxigênio (CQO)	kg	--	7,14E-04	--	2,29E-04	--	--	2,96E-04	8,54E-04	4,40E-04	6,28E-04
Cr	kg	--	5,62E-08	--	9,33E-08	--	--	n.d.	2,42E-07	n.d.	n.d.
Pb	kg	--	8,92E-09	--	1,87E-07	--	--	n.d.	4,84E-07	n.d.	n.d.
Ni	kg	--	n.d.	--	1,87E-07	--	--	n.d.	4,84E-07	n.d.	n.d.
Cd	kg	--	2,68E-09	--	1,87E-08	--	--	n.d.	4,84E-07	n.d.	n.d.
Zn	kg	--	n.d.	--	3,13E-06	--	--	n.d.	5,52E-06	n.d.	n.d.
P	kg	--	1,87E-06	--	n.d.	--	--	n.d.	1,90E-06	n.d.	n.d.
N	kg	--	3,21E-04	--	n.d.	--	--	n.d.	3,50E-04	n.d.	n.d.
Resíduos totais produzidos	kg	2,87E+00	3,81E+00	3,26E-03	3,00E-03	9,50E-01	7,00E-01	3,75E+00	1,70E+00	9,25E-01	4,16E-01
Resíduos valorizados	kg	2,81E+00	3,80E+00	3,24E-03	2,96E-03	9,45E-01	6,86E-01	3,75E+00	1,67E+00	8,76E-01	4,14E-01
Resíduos não valorizados	kg	6,67E-02	1,63E-02	1,38E-05	4,50E-05	4,75E-03	1,40E-02	7,17E-03	3,40E-02	4,96E-02	1,51E-03
Resíduos perigosos	kg	1,68E-03	2,10E-05	1,84E-06	2,66E-06	2,38E-03	1,08E-05	1,82E-03	1,63E-03	6,46E-04	1,82E-03

n.d. – não disponível (dado não medido ou não disponibilizado pela empresa); -- não aplicável

Tabela 34 – Distribuição percentual do consumo de energia (gás natural) no processo na fábrica de pavimento (A3)

Processo (%)	PC1	PC2	PC3	PP4	PE5	BC6	BC7	BP8	BP9	VC10
Atomização	30	35	35	--	--	33	30	--	--	35
Secagem	25	16	15	20	23	17	25	24	21	17
Cozedura	45	49	50	80	77	50	45	76	79	48

-- não aplicável



O consumo de matérias-primas está relacionado com a espessura dos diversos materiais, verificando-se que as perdas de material (originadas no processo, nomeadamente nas operações térmicas) neste tipo de material podem variar dos 2 a 6%, o que é típico para este material. As empresas em ciclo parcial apenas consomem pó atomizado (pasta cerâmica) e vidros e/ou corantes, sendo o calcário (carbonato de cálcio) usado no sistema de tratamento de efluentes gasosos (filtro fluoretos). Por outro lado, a classificação como vidros e corante não é a mesma nas amostras em estudo.

As empresas de porcelânico (cinco primeiras) consomem, em regra, mais combustível por unidade funcional e libertam mais dióxido de carbono e outras emissões para a atmosfera, sendo estas últimas influenciadas pela existência de sistemas de tratamento. O processo de cozedura (forno(s)) apresenta-se como o maior consumidor de energia (ver Tabela 34), segue-se o atomizador e depois a secagem, como seria de esperar face às necessidades térmicas envolvidas em cada processo.

A produção de resíduos é função de estratégias de economia circular e eficiência na gestão dos processos produtivos, classificação de resíduos ou sub-produto, verificando-se em regra que as empresas em ciclo completo possuem maiores quantidades, uma vez que têm mais atividades, contudo e como podem reciclar os seus resíduos, existe algum equilíbrio. Por outro lado, a grande maioria dos resíduos é valorizado. Por sua vez, as emissões para a água estão minimizadas nas empresas em ciclo completo, uma vez que, apesar de gerarem mais efluente (têm mais a seção de preparação de pasta), podem aproveitar a água tratada na ETARI (estação de tratamento de águas residuais industriais) total ou parcialmente.

### **4.3.2.5 Avaliação de impactes ambientais**

As categorias de impacto e indicadores para efetuar a avaliação de impacto do ciclo de vida foram as já mencionadas para os estudos de caso do tijolo e da telha, nomeadamente:

- aquecimento global, depleção da camada de ozono, depleção de recursos abióticos (elementos), depleção de recursos abióticos (fósseis), eutrofização, acidificação, formação de ozono fotoquímico (oxidação fotoquímica), usando o conjunto de fatores de caracterização do CML-IA (Leiden University) de Outubro de 2012, conforme a norma EN 15804+A1 (CEN, 2013);
- matéria particulada, uso do solo, toxicidade humana e ecotoxicidade para a água doce, escassez da água, usando os fatores de caracterização contemplados nos métodos recomendados pelo ILCD (EC-JRC, 2012), conforme mencionado na Recomendação n.º 2013/179/EU da UE que aborda a PAP;
- acidificação e oxidação fotoquímica complementarmente aos acima mencionados, mas pelos métodos recomendados pelo ILCD (EC-JRC, 2012), cujas unidades são distintas das previstas no conjunto de métodos sugeridos pelo CML-IA estabelecido na EN 15804+A1 (CEN, 2013).

A seleção destas categorias de impacto baseou-se na natureza dos dados de entrada e dos dados de saída, e consequente relevância, na possibilidade de quantificação, tipologia de impactos expectáveis e alinhados com a EN15804 e a PAP, robustez e aplicabilidade.

Na Tabela 12 do item 4.1.2.5 consta para cada parâmetro, a unidade, os métodos e referências bibliográficas usadas. Seguiu-se a fase de caracterização que envolve a conversão dos dados de inventário para unidades comuns, através da multiplicação por fatores de caracterização referidos nos métodos mencionados na Tabela 12, e posterior adição dos resultados convertidos, dentro de cada categoria de impacto.

### 4.3.3 Resultados e discussão

As tabelas A.13 e A.14, em anexo, apresentam o potencial impacto ambiental para as tipologias de pavimentos cerâmicos utilizadas em soluções construtivas, usando os métodos de avaliação de impactos referidos anteriormente (CML-IA, ILCD) para a unidade funcional (1 m<sup>2</sup>) e para a unidade declarada (1 kg) na abordagem do berço ao túmulo, enquanto as tabelas A.15 e A.16 apresentam a mesma tipologia de informação mas para a abordagem do berço ao portão (A1 a A3). Nestes resultados foram excluídas das fronteiras do sistema, a produção e manutenção de bens de capital, tais como edifícios, maquinaria, equipamentos, etc.

#### 4.3.3.1 Abordagem do berço ao túmulo

Da Figura 77 à Figura 91 representa-se a contribuição relativa de cada etapa ou módulo do ciclo de vida, com base na abordagem modular da EN 15804+A1:2013 de A (extração) a C (fim de vida) para o impacto ambiental total para as categorias de impacto ambiental em estudo.

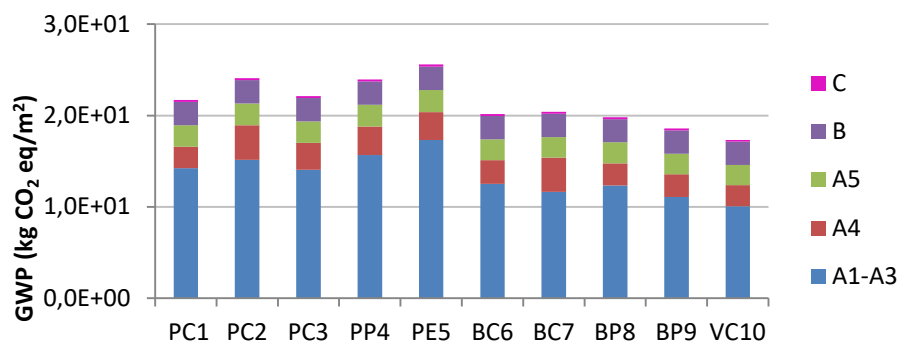


Figura 77 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para o aquecimento global (GWP) por m<sup>2</sup> de pavimento

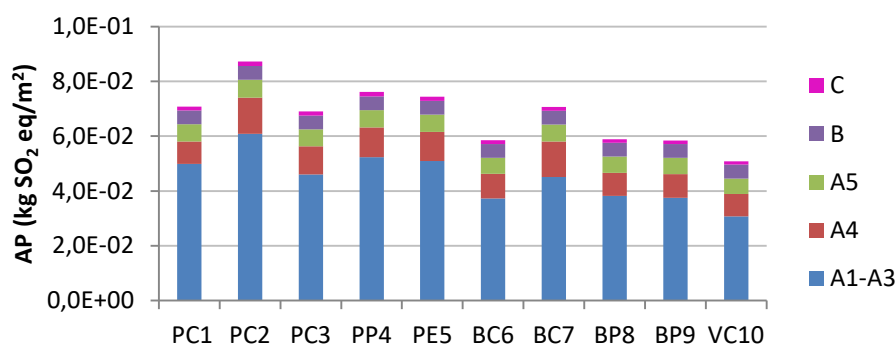


Figura 78 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a acidificação (AP) por m² de pavimento

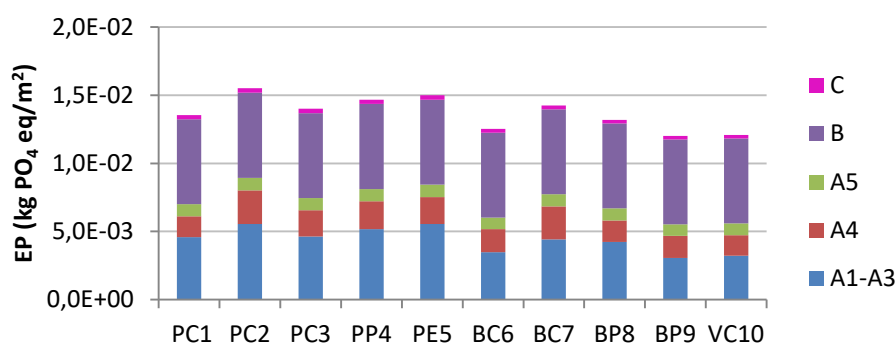


Figura 79 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a eutrofização (EP) por m² de pavimento

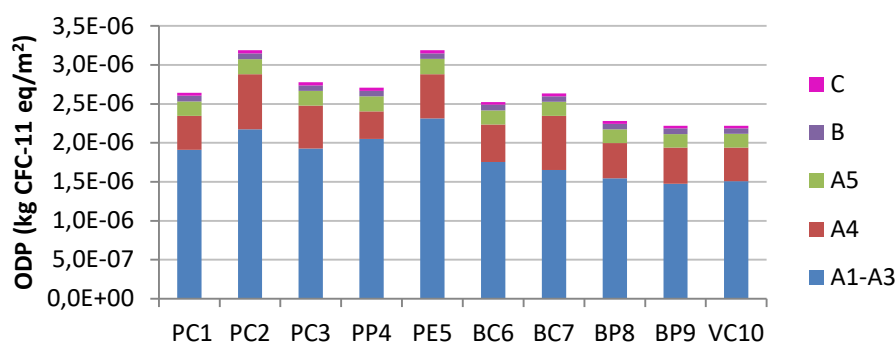


Figura 80 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a depleção da camada de ozono (ODP) por m² de pavimento

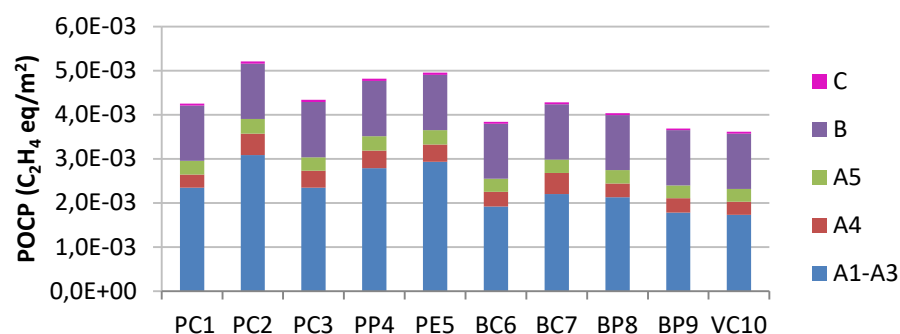


Figura 81 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a oxidação fotoquímica (POCP) por m² de pavimento

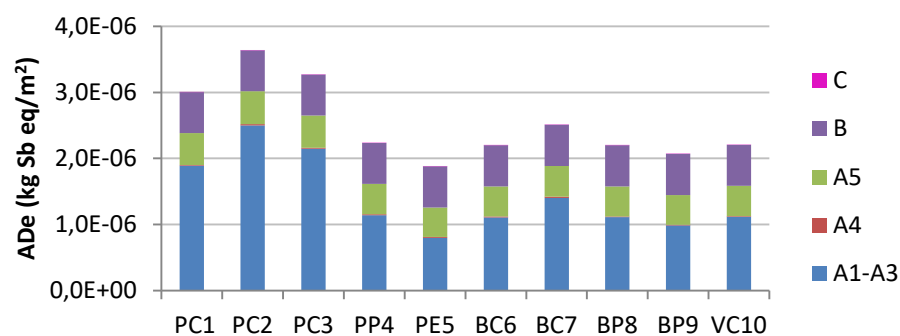


Figura 82 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por m² de pavimento

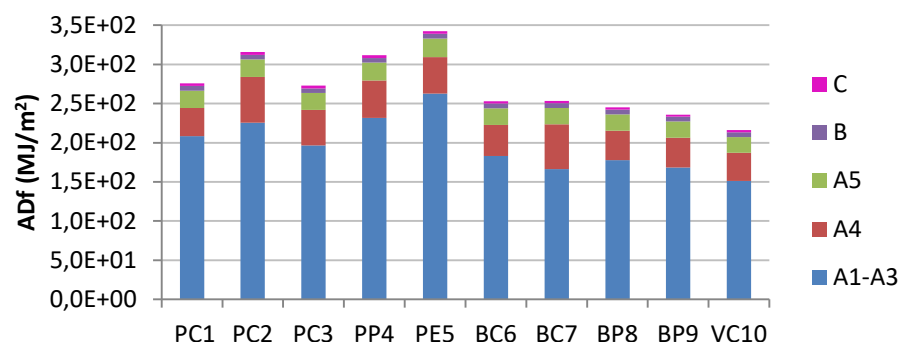


Figura 83 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a depleção de recursos – fósseis (ADf) por m² de pavimento

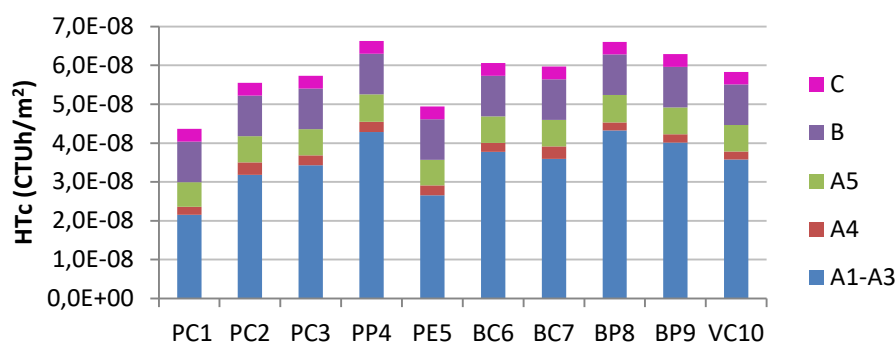


Figura 84 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – cancerígeno (HTc) por m² de pavimento

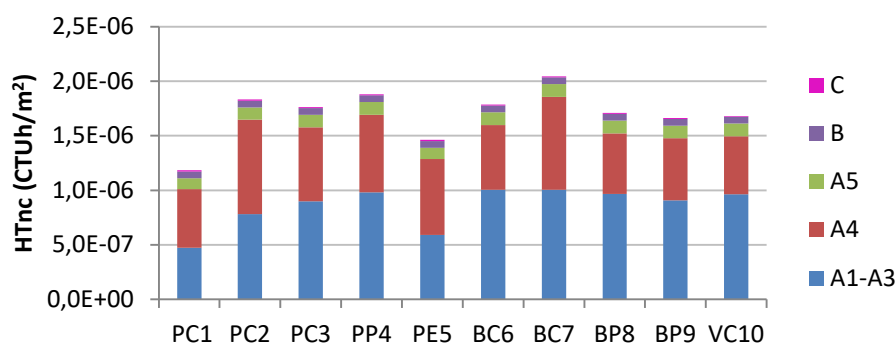


Figura 85 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m² de pavimento

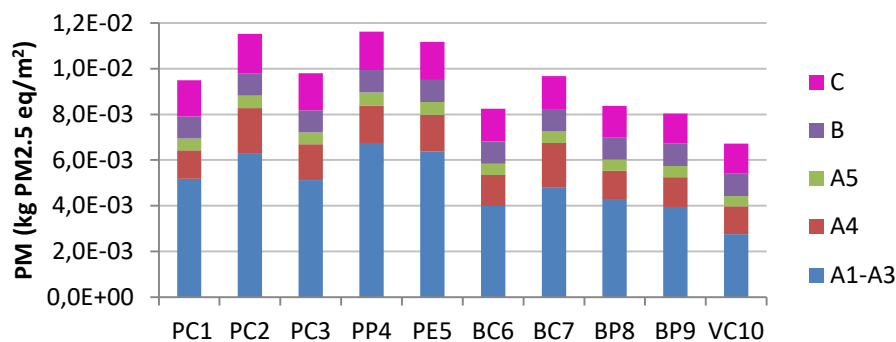


Figura 86 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para partículas (PM2.5) por m² de pavimento

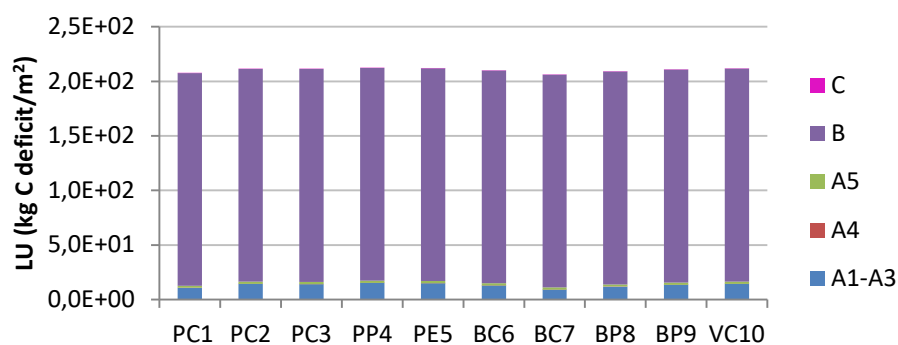


Figura 87 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para uso do solo (LU) por m<sup>2</sup> de pavimento

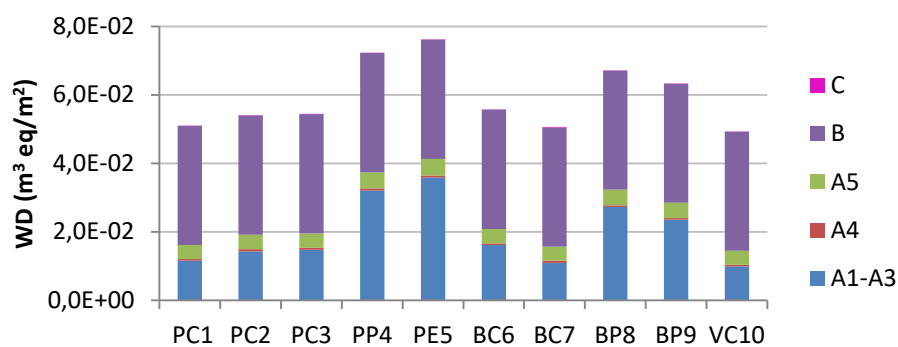


Figura 88 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a depleção da água (WD) por m<sup>2</sup> de pavimento

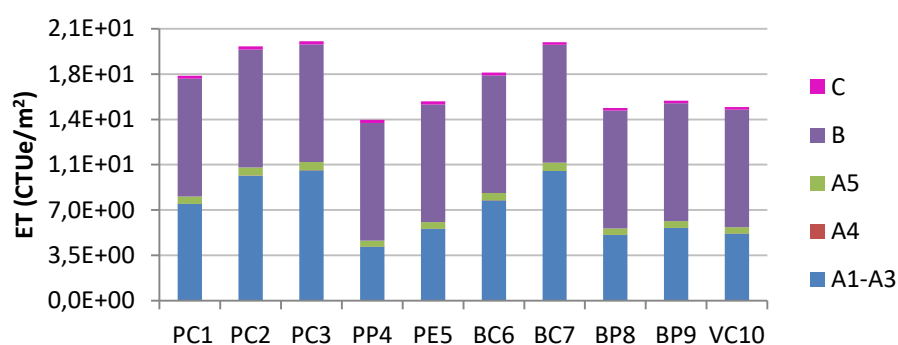


Figura 89 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para ecotoxicidade (ET) por m<sup>2</sup> de pavimento

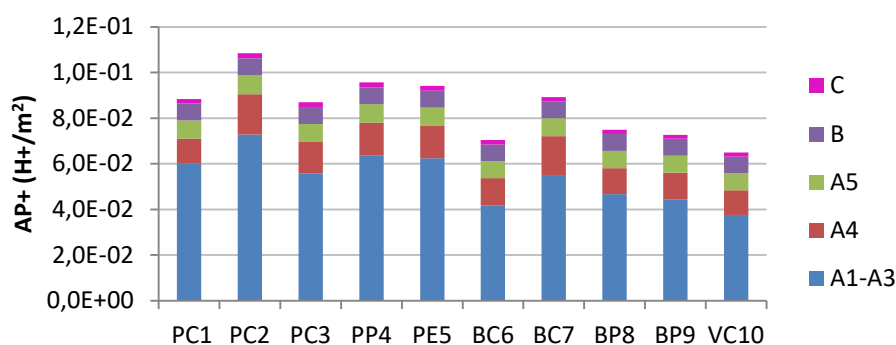


Figura 90 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para acidificação pelo método estipulado pelo ILCD (AP+) por m² de pavimento

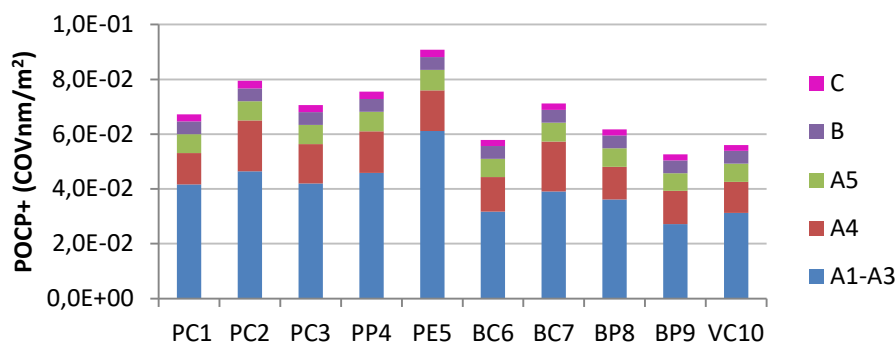


Figura 91 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para oxidação fotoquímica pelo método estipulado pelo ILCD (POCP+) por m² de pavimento

## i. Análise geral

De um modo genérico verifica-se que, para a maioria das categorias de impacto (exceto toxicidade humana e ecotoxicidade), os maiores impactos verificados por unidade funcional (m²) ocorrem para o pavimento porcelânico (com máximos para PE5 do grupo Ala ou PC2 do grupo Bla função das categorias de impactos, e depois PP4, PC3 e PC1 do grupo Bla), seguindo-se o pavimento em grés comum (BC6, BP7, BP8, BP9 do grupo BIb) e os menores impactos determinados foram para o pavimento vermelho (VC10 do grupo BIIa). Esta hierarquização de impactos estará relacionada com a maior massa que estas peças de porcelânico possuem por unidade funcional (m²) (ver Tabela 30) e também as maiores necessidades térmicas, em regra, para os grupos Ala e Bla, já que possuem menores porosidades, confirmadas em campo com os dados das temperaturas máximas de cozedura (1200 a 1250 °C) e respetivas curvas de cozedura, enquanto para os restantes produtos poderão ser usadas temperaturas na gama dos 1100 a 1200 °C.

Os consumos energéticos mais elevados no grés porcelânico conduzem a uma maior emissão de gases de combustão associados a emissões como o CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl, HF, que originam uma série de impactes como o aquecimento global, acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica, depleção de recursos fósseis (Almeida et al., 2016b). Já o modo de condução e operação dos fornos, as diferentes matérias-primas em uso e seu modo de composição (ex. quantidades) e tipologias de vidros ajudam também a explicar as diferenças encontradas nos impactes em ladrilhos da mesma tipologia. De mencionar que a tecnologia de extrusão (PE5) acarreta ciclos de cozedura posteriores mais longos e consequentemente maiores consumos específicos energéticos e consequentes emissões para a atmosfera.

Já no caso das categorias de impacto associadas à toxicidade humana e ecotoxicidade verifica-se um padrão distinto e menos uniforme face à tipologia de material cerâmico em estudo. Assim, este padrão parece estar mais associado à quantidade de vidros (aplicados por área), tratamentos subsequentes existentes (aplicados por área e que se refletem num consumo de energia elétrica e água adicional) e aos transportes. Os menores valores registam-se para a PC1 e PE5, empresas com menores quantidades de vidros e/ou menores processos de polimento (que consomem energia) e/ou menores transportes, enquanto os impactes maiores ocorrem para PP4, BC7 e BP8.

Também no que se refere à depleção da água, verifica-se um comportamento distinto nos materiais cerâmicos e mais associado à recirculação que cada empresa consegue efetuar. Por outro lado, verifica-se que as empresas de ciclo completo (identificadas com a segunda letra com C) conseguem em regra menores impactes, tal como seria de esperar, uma vez que a possibilidade de reutilização da água é maior.

Neste contexto, verifica-se o seguinte comportamento em função das categorias de impacto (ver detalhe na Tabela A13 e A.14 em anexo):

- GWP, AP, EP, ODP, ADf, Ade e PM2.5 – a dispersão de valores (entre máximo e mínimo por categoria) é menor por unidade declarada do que por unidade funcional (m<sup>2</sup>). Este comportamento parece estar associado a categorias de impacto onde o processo térmico de cozedura e secagem são determinantes, demonstrando ainda a influência da espessura do material. Por unidade declarada (kg) verifica-se que nem sempre os ladrilhos de porcelanato possuem o pior comportamento;
- HTc, HTnc, LU, WD e ET - a dispersão de valores é menor por unidade funcional (m<sup>2</sup>) quando comparada com unidade declarada (kg). Tal facto poderá ser explicado por estas categorias não serem tão influenciadas pelo processo de cozedura, mas antes pela aplicação do vidro, que se efetua por área de superfície de pavimento (m<sup>2</sup>), tal como as operações de tratamento subsequentes como sejam o polimento (que consomem energia e água).



Quando se compara os ladrilhos por prensagem em ciclo completo (amostras com a segunda letra com “C”) com os ladrilhos em ciclo parcial (amostras com a segunda letra “P”) os valores também não são substancialmente diferentes (variações em regra inferiores a 15%), verificando-se os seguintes desempenhos por m<sup>2</sup> para:

- Grés Porcelânico – o ciclo parcial (PP4) possui pior desempenho que PC1 e PC3. Porém um desempenho afim a PC2, ou ligeiramente melhor como é o caso para AP, EP, ODP, POCP, ADe e ET, ou ligeiramente pior que PC2 para ADf, HTc e WD;
- Grés em pasta branca – verifica-se uma tendência para as amostras de ciclo parcial possuírem um desempenho ligeiramente melhor (que o BC7) ou semelhante (BC6) para a maioria das categorias de impacto em estudo, o que poderá indiciar a eficiência das empresas de preparação de pasta. A exceção acontece para a categoria de toxicidade HTc onde BP8 e BP9 apresentam pior desempenho.

### ii. Contributo de cada etapa do ciclo de vida

Os maiores impactos ao longo do ciclo de vida registam-se para a etapa do berço ao portão (módulos de A1 a A3) que representa a etapa mais significativa (40% a 77%) para todas as categorias de impacto, justificado pelos consumos intensivos de recursos (matérias-primas, energia e água) e consequentes emissões, exceto eutrofização, uso do solo, depleção da água e ecotoxicidade, onde a etapa de uso (etapa B) assume um papel preponderante. A etapa de produção (A1-A3) apresenta-se ainda como a segunda mais relevante para a eutrofização (25% a 37%); o uso do solo (4% a 7%); a depleção da água (20% a 47%) (para o pavimento extrudido PE5 a etapa A1-A3 representa 47% praticamente o mesmo que a etapa B com 46%, mas este apresenta uma tecnologia de fabrico distinta com um maior consumo de água face aos restantes que usam prensagem a seco), 30 % a 50% dos impactos da ecotoxicidade (exceto para PC2, PC3 e BC7, onde a etapa A1-A3 é um pouco mais relevante com 49% a 50% do impacto global que a etapa B, associado ao tratamento subsequente nomeadamente polimento, produção de embalagem de madeira).

O módulo de transporte do produto (A4), baseada num cenário de transporte por camião de 25 toneladas com um percurso de 1000 km de distância, é a segunda mais relevante para o aquecimento global (11% a 18%), acidificação (12% a 19%), depleção da camada de ozono (13% a 26%), depleção de recursos fósseis (13% a 23%), toxicidade humana não cancerígena (32% a 48%) e oxidação fotoquímica (16% a 26% para o método do ILCD). Para a categoria de partículas (PM2.5) verifica-se também que a etapa A4 representa 13% a 20%, com um peso muito semelhante ao fim de vida (etapa C) que representa 15% a 20%. Já para a eutrofização e oxidação fotoquímica (CML-IA) representa a terceira mais relevante (11% a 17%).

Já o módulo de construção (A5), influenciado pela contribuição do cimento-cola e a água, exibe o terceiro ou quarto lugar para a maioria das categorias, assim representa 14% a 24% da depleção de recursos elementos; valores na ordem dos 10% a 15% para aquecimento global, acidificação (CML-IA e ILCD) e toxicidade humana cancerígena, e inferiores a 10% para as restantes categorias em estudo.

A etapa de uso (B), com a utilização de detergente e água para as operações de lavagem do ladrilho e o próprio uso do edifício, é a mais relevante para a eutrofização com 40% a 52%, o uso do solo com 92% a 95%, a depleção da água com 46% a 70% e a ecotoxicidade com 45% a 65% (para PC2, PC3 e BC7, a etapa mais representativa é a A1-A3 embora numa magnitude semelhante de 49 a 50%). Sendo ainda relevante (segundo contribuinte com 16% a 35%) para a depleção de recursos elementos, oxidação fotoquímica (CML-IA) e toxicidade humana cancerígena. Para as restantes categorias de impacto a sua representatividade é pouco significativa ou mesmo insignificante.

Finalmente a etapa de fim de vida (C) é a segunda mais relevante para a categoria de impacto das partículas (15 a 20%) relacionada com o tipo de atividades desenvolvidas nas etapas de demolição e desconstrução e consequentes impactes na qualidade do ar, apesar de ser residual para todas as restantes categorias de impacto.

### **iii. Evolução temporal**

Estes resultados de impacto para o pavimento cerâmico (ver tabelas A.13 a A.16 em anexo) que refletem o desempenho em 2015, são consistentes com os anteriores resultados relativos ao ano de 2010 (Almeida et al., 2014b), 2011 (Almeida et al., 2013a), 2012 (Almeida et al., 2016b) e 2014 (Almeida et al., 2016a), já que são anos próximos e sem evoluções tecnológicas de relevo. Verificando-se porém que os impactes ambientais determinados para 2012 são tendencialmente mais baixos para a depleção de recursos fósseis, aquecimento global e depleção da camada de ozono e toxicidade não cancerígena, explicados talvez por uma maior estabilidade do processo face à estabilidade do mercado, enquanto em 2014 e 2015 se inicia a retoma produtiva deste subsector. Pelo contrário, a acidificação e eutrofização em 2010, 2011 e 2012 apresenta-se, em regra, mais elevada do que a atual, face à alteração do mix elétrico nacional (maior penetração de renováveis em 2016). O melhor desempenho determinado em 2015 (tabelas A.13 a A.16) é, no entanto, o melhor valor dos diversos obtidos.

#### **4.3.3.2 Abordagem do berço ao portão**

Uma vez que a etapa do berço ao portão (A1-A3) é a mais significativa para a maioria das categorias de impacto, será detalhada em termos de análise dos diferentes contributos dos processos que a compõem.

A Figura 92 até à Figura 106 evidenciam a contribuição de cada processo unitário para a etapa do berço ao portão (etapas A1 a A3) nomeadamente para a:

- produção de matérias-primas e auxiliares (argila, caulino, carbonato de cálcio, quartzo e feldspato, materiais para decoração incluindo vidragem, lubrificante, materiais auxiliares para manutenção e pó atomizado), designada na legenda por “Prod. MP e aux”;
- produção de materiais de embalagem (cartão, plástico e paletes de madeira), designada por “Prod. embalagem”;
- produção de combustíveis (gás natural, GPL e gasóleo), designada a por “Prod. combustíveis”;
- produção de eletricidade, designada por “Prod. eletricidade”;
- tratamentos de águas, água residual e resíduos, designada por “Tratamento emissões”;
- atividades decorrentes na fábrica (consumos e emissões decorrentes do processo de fabrico cerâmico, com destaque para a preparação de pasta atomizada, secagem e cozedura) designada por “Atividades na fábrica”; e
- as atividades de transporte (transporte de matérias-primas e auxiliares dos locais de extração e/ou processamento para a fábrica), designada por “Transporte”.

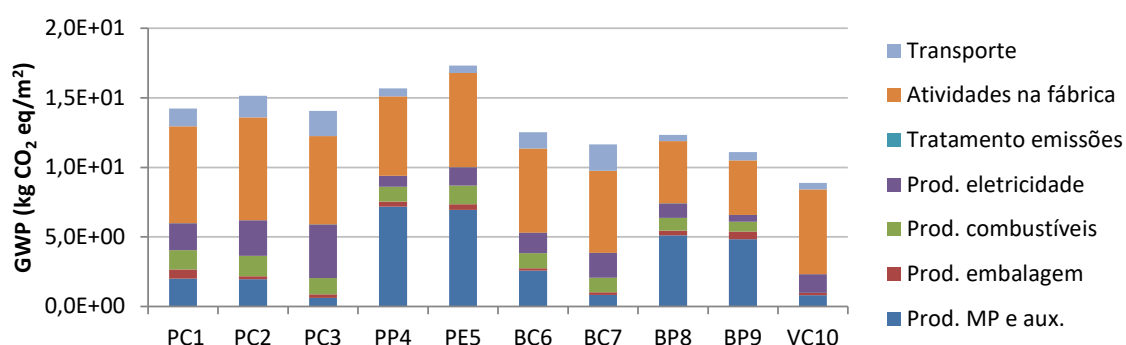


Figura 92 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para o aquecimento global (GWP) por m²

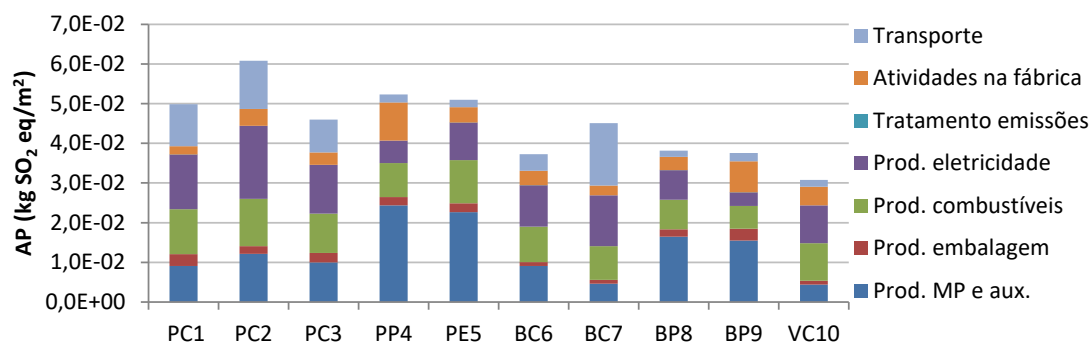


Figura 93 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a acidificação (AP) por m²

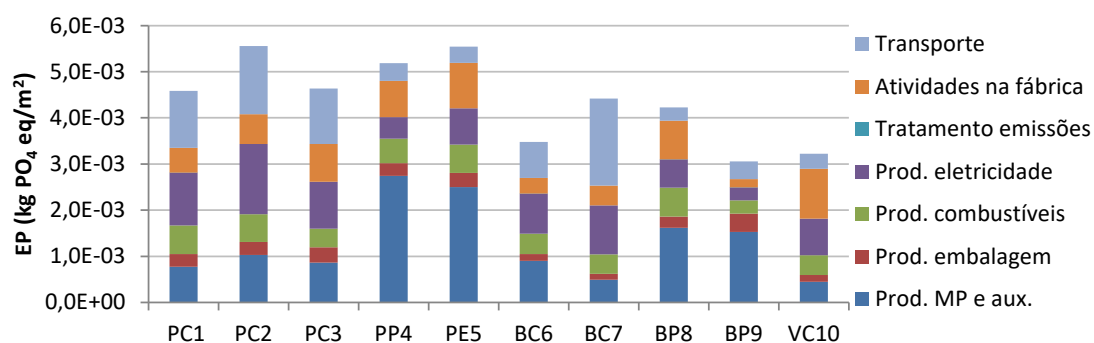


Figura 94 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a eutrofização (EP) por m²

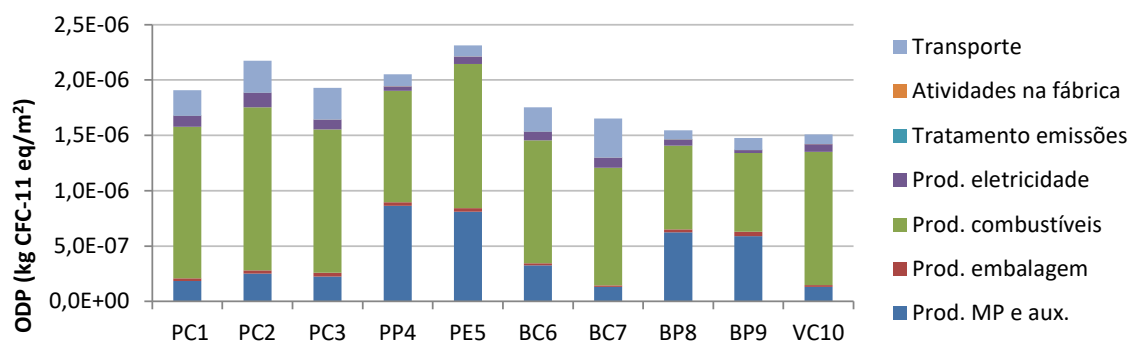


Figura 95 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a camada de ozono (ODP) por m²

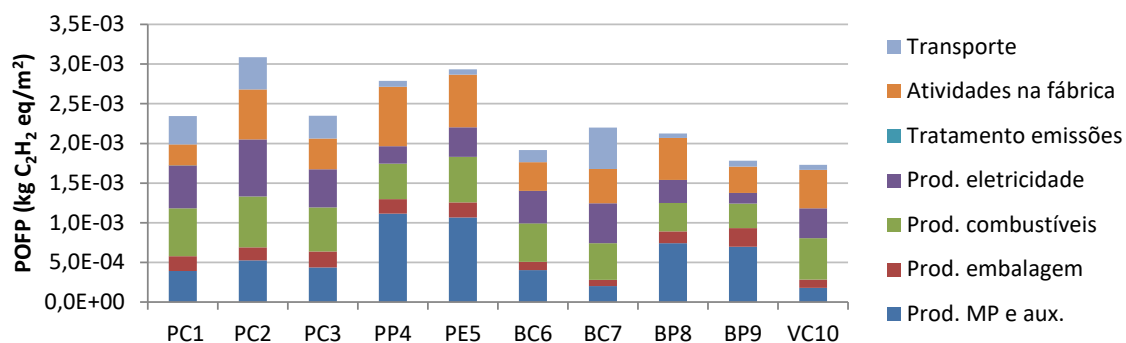


Figura 96 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a oxidação fotoquímica (POFP) por  $m^2$

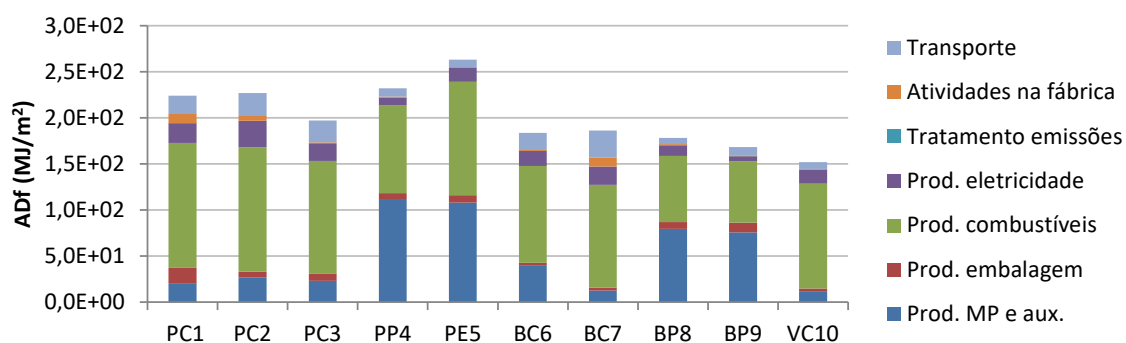


Figura 97 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a depleção de recursos – fósseis (ADf) por  $m^2$

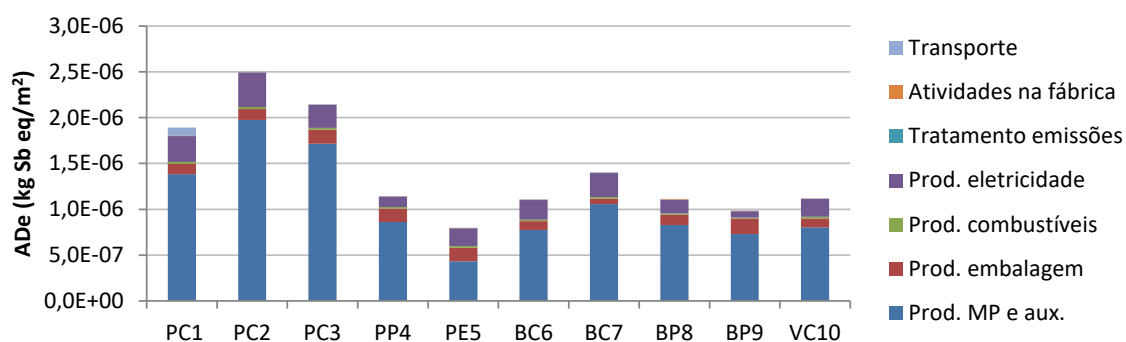


Figura 98 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por  $m^2$

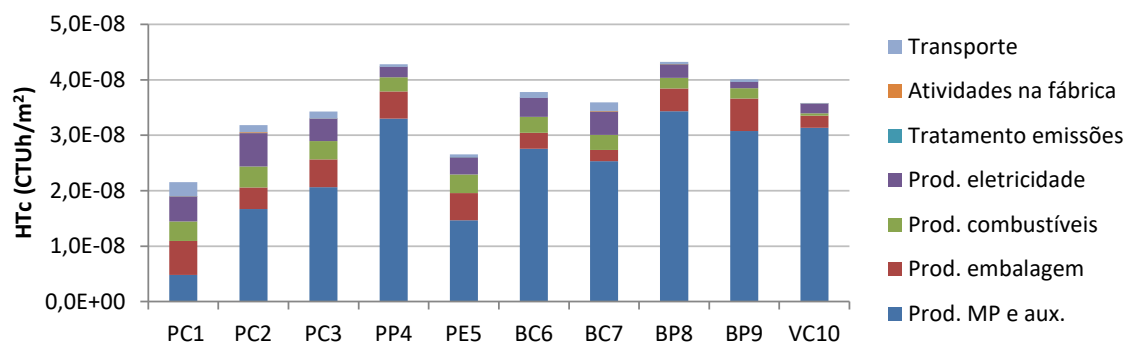


Figura 99 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – cancerígena (HTc) por m²

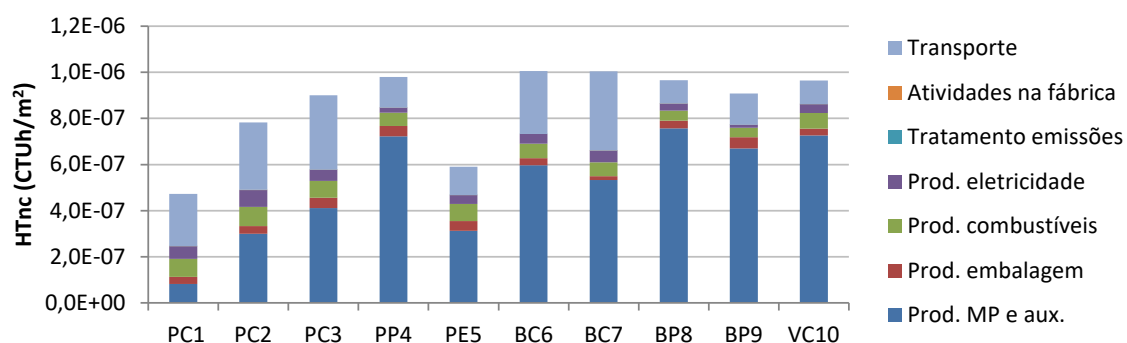


Figura 100 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – não cancerígena (HTnc) por m²

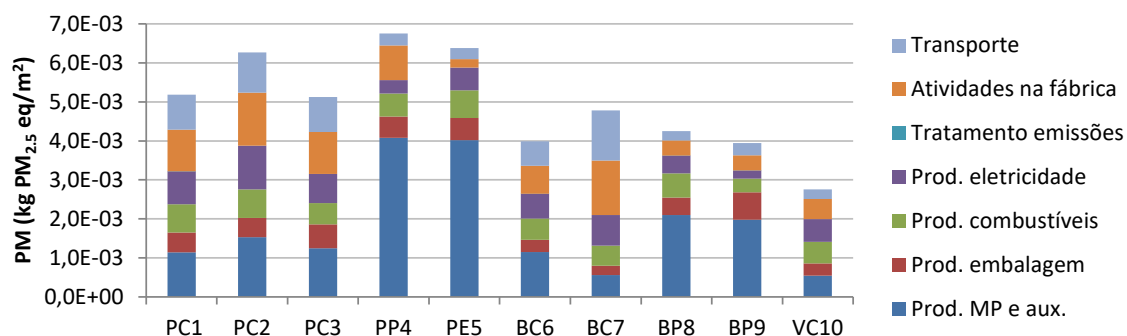


Figura 101 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para partículas (PM2.5) por m²

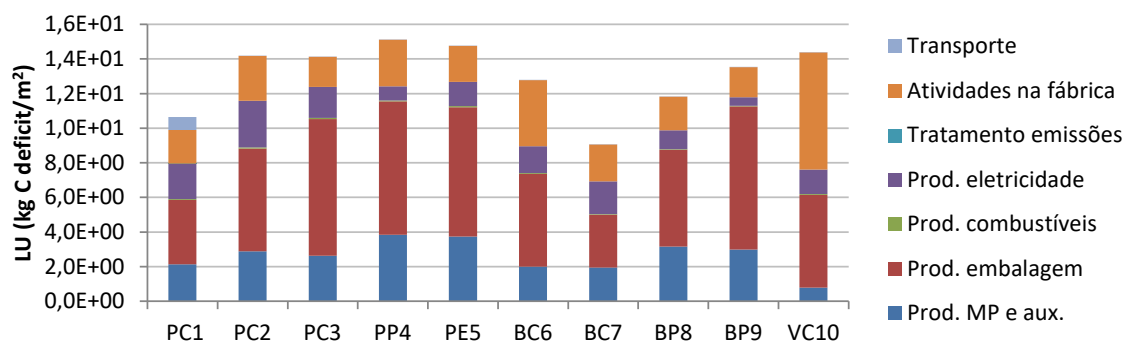


Figura 102 – Contribuição de cada processo da etapa A1-A3) para uso do solo (LU) por m²

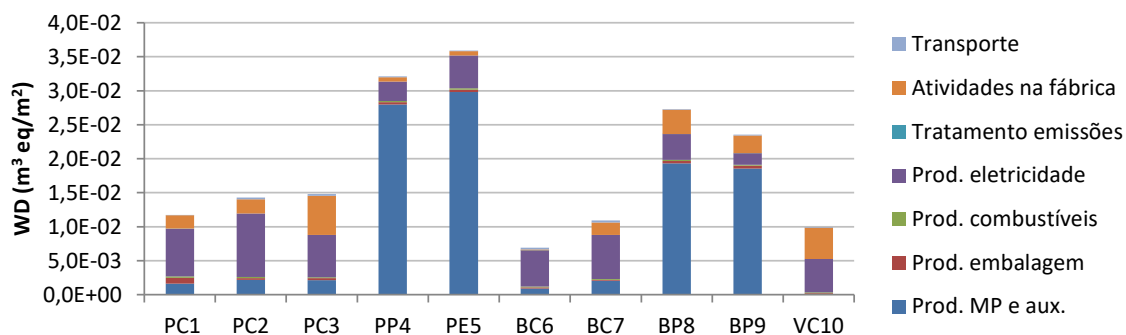


Figura 103 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para depleção da água (WD) por m²

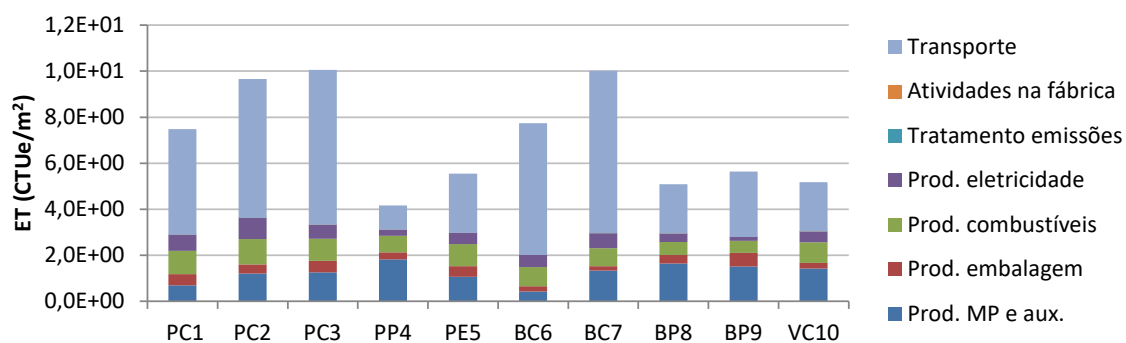


Figura 104 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para ecotoxicidade (ET) por m²

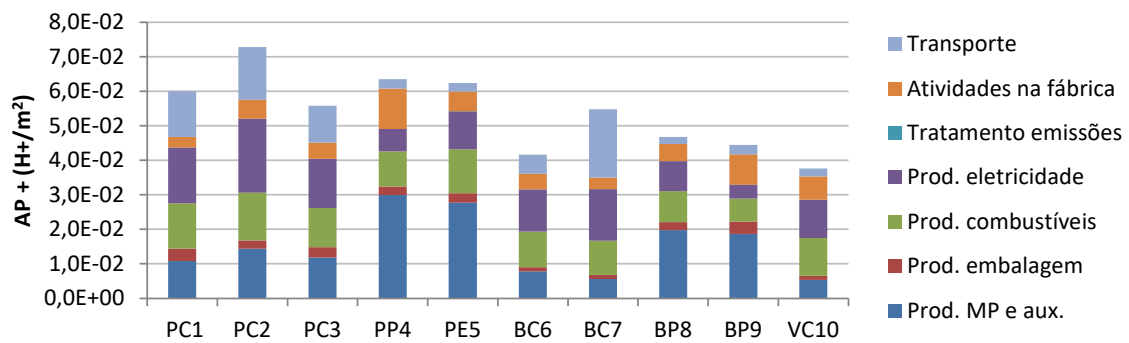


Figura 105 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para acidificação pelo método estipulado pelo ILCD (AP+) por m<sup>2</sup>

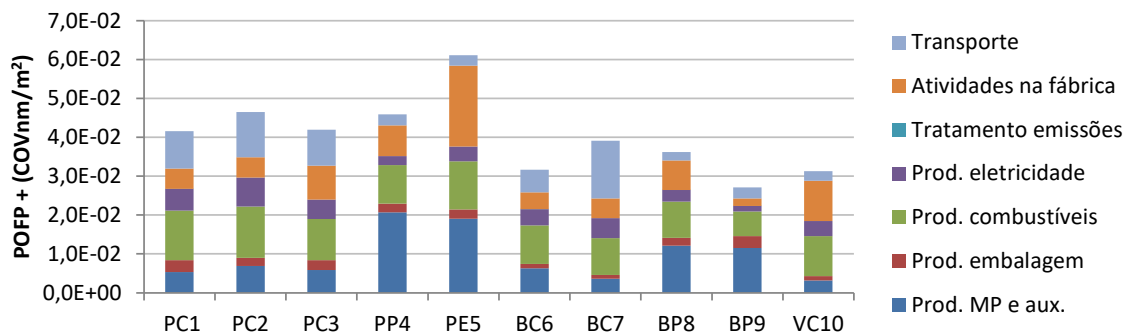


Figura 106 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para Oxidação fotoquímica pelo método estipulado pelo ILCD (POCP+) por m<sup>2</sup>

### i. Comportamento por categoria de impacto

Para o aquecimento global, acidificação (CML-IA e ILCD), eutrofização, depleção da camada de ozono, oxidação fotoquímica (CML-IA e ILCD), partículas (PM<sub>2.5</sub>) verifica-se que os valores mais elevados são em regra atingidos para o grés porcelânico (PC1, PC2, PC3, PP4 e PE5), seguido do pavimento em grés comum de pasta branca (BC6, BC7, BP8, BP9) e os menores para o pavimento em pasta vermelha (VC10). Este comportamento é explicado pelas maiores temperaturas de cozedura que o grés porcelânico exige face aos restantes materiais, implicando consumos energéticos mais elevados e consequentes emissões para a atmosfera. De mencionar que a maioria destas fábricas dispõe de sistemas de tratamento de fluoretos que removem também outros gases como ácido clorídrico, bem como COVs, SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> (apesar de com menor eficiência) que contribuem para estas categorias de impacto (acidificação, eutrofização e oxidação fotoquímica). Não se verificam grandes diferenças entre o ciclo parcial e o ciclo completo para cada tipologia de produto cerâmico em estudo.



Para o aquecimento global constata-se que as “atividades na fábrica” são o processo mais relevante (45% a 61%) para o ciclo completo, explicado principalmente pela emissão de CO<sub>2</sub> associado às emissões da cozedura, atomização e secagem. Já nas amostras em ciclo parcial a relevância é ligeiramente superior para a “produção de matérias-primas e auxiliares” (40% a 46%) que inclui para além das atividades de extração e processamento (comuns a todos os ladrilhos), as atividades do fornecedor especializado no fabrico de pasta (ex. preparação de pasta, atomização e transporte), embora com um peso muito semelhante às “atividades na fábrica” (35% a 39%).

No caso da acidificação verifica-se que a emissão de SO<sub>x</sub> é responsável por mais de dois terços desta, seguindo-se o NO<sub>x</sub> com cerca de um terço. Estas emissões estão associadas às operações de combustão inerentes à “produção da eletricidade” (27% a 31%). Segue-se o “transporte”, a “produção de combustíveis” e a “produção de matérias-primas e auxiliares” nas empresas em ciclo completo. No entanto, para os ladrilhos fabricados em ciclo parcial, a “produção de matérias-primas e auxiliares” é a etapa dominante (41% a 47%), seguindo-se depois os outros três processos mencionados para o ciclo completo.

Também na eutrofização o padrão de comportamento é semelhante ao descrito para a acidificação, por muito que o contributo dos processos seja distinto e esteja associado principalmente ao NO<sub>x</sub> (superior a 70%) associado a diversas atividades de combustão, seguido das emissões de fosfatos, amónia e CQO. Assim, nas empresas em ciclo parcial, verifica-se mais uma vez o domínio da “produção de matérias-primas e auxiliares” (38% a 53%), enquanto nas de ciclo completo se verifica que o “transporte” e a “produção de eletricidade” são as mais relevantes (representam entre 20 e 25% cada).

Igualmente na oxidação fotoquímica se verifica um comportamento afim ao descrito anteriormente, ou seja, nos ladrilhos conformados em ciclo parcial, prevalece o domínio da “produção de matérias-primas e auxiliares” (35% a 45%) seguido das “atividades na fábrica”, enquanto nos ladrilhos em ciclo completo pelo método CML-IA sobressaem a “produção da eletricidade” (21% a 24%) ou a “produção de combustíveis” (21% a 26%) devido à emissão de SO<sub>2</sub> (representa mais de metade dos impactes), seguindo-se o CO, NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e alguns COVs. Já pelo método ILCD se verifica que os principais responsáveis são a “produção de combustíveis” (24% a 31%) ou o “transporte” (18% a 38%) para os ladrilhos em ciclo completo.

O comportamento é análogo para as partículas (PM<sub>2.5</sub>), isto é, para os ladrilhos sujeitos a ciclo parcial, verifica-se a primazia da “produção de matérias-primas e auxiliares” (49% a 63%) evidenciando o contributo da atomização para esta categoria de impacte. Contudo nos ladrilhos em ciclo completo sobressaem as “atividades na fábrica” e a “produção da eletricidade” ou mesmo a “produção de combustíveis” (menor relevo). Dentro do processo “atividades na fábrica”, verifica-se mesmo que, em termos absolutos, os menores valores são obtidos para PE5, BP8 e BP9 (ciclo parcial) e os maiores para PC2 e BC7 (ciclo completo),

o que estará associado ao processo de atomização (ocorre apenas nas empresas em ciclo completo) que produz emissões de partículas para a atmosfera (apesar de todas as empresas possuírem ciclone seguido de lavador de gases, MTD do sector de acordo com o BREF da cerâmica (European Commission, 2007)).

Já na categoria da depleção da camada de ozono, constata-se que o porcelânico tem o pior desempenho, tal como expectável, por ter um consumo de gás natural superior, e a “produção de combustíveis” ser o principal responsável (48% a 80%) do impacte, associado ao uso de gases de refrigeração com substâncias depletoras da camada de ozono. De mencionar a particularidade de, nas amostras em ciclo parcial, o processo de “produção de matérias-primas e auxiliares” representar de 35 a 42% do impacte total.

Do mesmo modo, para a depleção de recursos fósseis, a “produção de combustíveis” assume o processo mais relevante no ciclo completo, representando 40% a 75% para os ladrilhos, sendo como expectável o melhor desempenho alcançado para o pavimento em pasta vermelha (VC10) e o pior para os ladrilhos de grés porcelânico já que possuem um maior consumo específico de gás natural. Nos ladrilhos fabricados por ciclo parcial (PP4, BP8 e BP9) a “produção de matérias-primas e auxiliares” representa de 41% a 48% do impacte total.

No que respeita à depleção de recursos (elementos) a “produção de matérias-primas e auxiliares” é o maior contribuinte (54 a 80%), tal como seria de esperar face à natureza destas atividades. O comportamento por tipologia de material cerâmico é menos uniforme, sendo de destacar o contributo do caulino nas empresas de porcelanato, cuja extração e processamento envolve mais operações que as restantes matérias-primas.

No que respeita à toxicidade humana (HTc e HTnc) o comportamento é distinto, e menos dependente da tipologia de produtos cerâmicos, com os menores impactes para PC1 e PE5 e os máximos a verificaram-se para PP4, BP8 e BP9, estando mais correlacionado com a quantidade de vidros (aplicados por área), os tratamentos subsequentes (aplicados por área e que implicam consumos de eletricidade e água) e os transportes que contêm/libertam alguns elementos que contribuem para esta categoria, como sejam os metais pesados. A “produção de matérias-primas e auxiliares” é o principal contribuinte para a toxicidade cancerígena (53% a 88%) e não cancerígena (38% a 75%) com a exceção do PC1 (ladrilho sem aplicação de vidros).

No caso da ecotoxicidade verifica-se que o “transporte” é o principal contribuinte (41% a 74%) para os ladrilhos, exceto PP4 onde representa 25% (após a produção de matérias-primas e auxiliares com 44%), explicado pelas baixas distâncias percorridas pelas matérias-primas face a outros ladrilhos, nomeadamente as que adquirem algumas matérias-primas a Espanha (PC1, PC2, BC6) e na Turquia, Inglaterra e França (PC2, PC3 e BC7).

Contribuem para a toxicidade humana cancerígena (HTc) os metais pesados libertados, nomeadamente o crómio (água, ar) (maioritário), mercúrio (ar) e arsénio (ar e água), enquanto para a toxicidade não cancerígena (HTnc) são o zinco (ar) (maioritário), mercúrio (ar), bário (água), chumbo (ar, água), associados maioritariamente à produção de eletricidade, transporte e operações de combustão (cozedura na fábrica). Já no caso da ecotoxicidade, o maior contributo é o do antimónio (mais de 40%), seguido do zinco, bário, cobre, vanádio e crómio.

Para o uso do solo, o processo dominante é a “produção de embalagem” (34% a 61%), devido ao contributo das paletes de madeira, seguido da “produção de matérias-primas e auxiliares” para a maioria dos ladrilhos.

Finalmente para a depleção da água verifica-se que os ladrilhos conformados em ciclo parcial possuem valores superiores aos conformados em ciclo completo. Verifica-se que a “produção de matérias-primas e auxiliares” é o processo dominante para ladrilhos em ciclo parcial (71% a 87%), refletindo as operações de consumo de água e lavagens que ocorrem na unidade industrial que produz o pó atomizado, particularmente nos moinhos e atomizadores. Por outro lado, nas fábricas em ciclo completo, a “produção de eletricidade” apresenta o maior contributo (42% a 77%), seguindo-se as “atividades na fábrica” ou a “produção de matérias-primas e auxiliares” em função da maior ou menor possibilidade de recirculação de água que as fábricas em ciclo completo apresentam.

Nestas circunstâncias, e da análise da Figura 92 até à Figura 106 pode-se inferir que:

- a “produção de matérias-primas e auxiliares” é o maior contribuinte para a depleção de recursos elementos (54% a 79%) e para a toxicidade cancerígena (38% a 75%, exceto para PC1 que consome quantidades mínimas de vidrados e afins). É ainda o maior contribuinte mas apenas para os ladrilhos em ciclo parcial para as categorias de aquecimento global, acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica, depleção de recursos fósseis, depleção da água e partículas (PM2.5);
- a “produção de embalagem” é o processo dominante para o uso do solo (34% a 61%), e possui alguma relevância para a toxicidade humana cancerígena (6% a 29%), e depleção de recursos elementos (apenas para o ciclo parcial variando de 10% a 18%);
- a “produção de combustíveis” é o maior contribuinte para a depleção da camada de ozono (face aos arrefecimentos necessários na linha de gás natural) (48% a 80%), para a depleção de recursos fósseis (47% a 75% apenas para o ciclo completo). Apresenta ainda um contributo moderado (15% a 33%) para a acidificação e oxidação fotoquímica;
- a “produção da eletricidade” é o processo dominante para os pavimentos em ciclo completo nas categorias de acidificação, oxidação fotoquímica (CML-IA), depleção

de água e eutrofização (juntamente com transporte), tal como seria de esperar uma vez que, a secção de preparação de pasta possui uma série de equipamentos alimentados a eletricidade (ex. moinhos, motores, etc.). Para as restantes categorias pode representar a segunda, terceira ou mesmo quarta posição;

- o “tratamento de águas, águas residuais, resíduos” não é relevante para nenhuma das categorias de impacto (representando menos de 1%);
- as “atividades na fábrica” são dominantes para o aquecimento global (45% a 61%) e partículas (18% a 29%) nas fábricas em ciclo completo, enquanto nas de ciclo parcial assumem a segunda posição logo após a “produção de matérias-primas e auxiliares” visto este último processo já incluir a atomização. Possuem ainda alguma relevância para a acidificação, eutrofização e a oxidação fotoquímica (CML-IA);
- o “transporte” é o processo dominante para a ecotoxicidade (41% a 74%, exceto PP4 cujas matérias-primas são mais locais logo as tkm são inferiores), eutrofização nas empresas de ciclo completo (juntamente com a “produção de eletricidade”) (22% a 43%) e para a toxicidade humana (não cancerígena) (PC1, PC2 e BC7 que adquirem matérias-primas ao estrangeiro). Apresenta um contributo moderado (11% a 36%) para a acidificação, depleção da camada de ozono, oxidação fotoquímica, depleção de recursos fósseis e partículas (PM2.5).

## **ii. Contributo da infraestrutura**

O contributo das infraestruturas (construção de edifícios fabris, maquinaria, equipamentos, etc.) nos resultados da abordagem do berço ao portão (A1-A3), que é a mais relevante para a maioria das categorias de impacto, encontra-se presente na Tabela 35. Este cálculo foi efetuado com base nos dados presentes no Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014), de forma a avaliar os impactos que esta tipologia de infraestruturas poderá ter nos impactos do pavimento cerâmico.

Da análise da Tabela 35 constata-se que o comportamento, por categoria de impacto, é muito semelhante em todos os pavimentos em estudo não existindo diferenças significativas por tipologia de material ou tipologia do processo de fabrico. Verifica-se que a depleção de recursos abióticos elementos é a categoria de impacto cuja influência das infraestruturas é mais acentuada variando de 80% a 93%, seguindo-se o uso do solo com 46% a 65%, depois a toxicidade humana - efeito cancerígeno, que varia de 33% a 64%. Isto deverá estar associado à extração de recursos para fabrico da diversa maquinaria (metálica em aço e em ferro, etc.), e da própria fábrica (constituída maioritariamente por tijolo e betão). A produção de bens capitais influencia ainda a própria ocupação do solo, tal como seria também de esperar. Para as restantes categorias de impacto a influência é também diminuta e em regra inferior a 10%.

*Tabela 35 – Contributo das infraestruturas (produção de bens capitais na abordagem do berço ao portão do pavimento) (%)*

<b>Categoria de impacte</b>	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PP4</b>	<b>PE5</b>	<b>BC6</b>	<b>BP7</b>	<b>BP8</b>	<b>BP9</b>	<b>VC10</b>
Aquecimento global (GWP)	4	5	5	4	3	5	6	4	4	4
Acidificação (AP)	7	8	9	7	7	10	10	7	8	8
Eutrofização (EP)	11	12	13	12	11	15	13	11	15	12
Oxidação fotoquímica (POCP)	8	8	10	7	7	10	10	7	9	8
Depleção da camada de ozono (ODP)	4	5	5	4	3	5	6	4	4	3
Depleção de recursos abióticos (ADe)	80	81	83	91	93	90	87	89	90	85
Depleção de rec. – fósseis (ADf)	4	5	5	4	3	5	6	4	4	4
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	33	57	52	53	64	49	50	46	46	37
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	14	18	15	17	24	14	13	14	14	10
Matéria particulada (PM2.5)	9	10	11	7	7	12	12	9	9	12
Uso do solo (LU)	60	58	56	57	59	57	65	57	53	46
Depleção de recursos - água (WD)	0	0	0	4	3	0	0	2	2	0
Ecotoxicidade (ET)	8	9	7	13	14	8	7	12	11	9
Acidificação (A+)	7	8	9	7	7	10	10	8	8	8
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	7	9	9	8	6	10	10	7	10	7

Assim, na elaboração de uma DAP usualmente não se incluem as infraestruturas, no entanto e pelo menos para a depleção de recursos abióticos elementos, uso do solo e toxicidade humana - efeito cancerígeno poderão ser relevantes. Estas considerações são semelhantes aos restantes estudos de caso.

Neste âmbito será ainda de ressaltar a incerteza associada à base de dados.

#### **4.3.3.3 Comparação e discussão com outros estudos**

De mencionar que é difícil comparar os resultados do presente estudo com os anteriores porque alguns dos estudos não apresentam os resultados em valores absolutos, mas antes em percentagens relativas com a contribuição de cada processo. Além disso, e tal como já mencionado no item 3.2.3 (estado da arte), os métodos de avaliação de impactes (modelos de caracterização) são diferentes ou sofreram atualizações temporais, ou utilizaram bases de dados que também sofreram atualizações. Apesar das limitações, apresentam-se na Tabela 36 os resultados de estudos publicados (ver Tabela 7 no item 3.2.3) com métodos comuns aos utilizados nesta tese para diversas categorias de impacte e na Tabela 37 resultados publicados em DAP sectoriais validadas por terceira parte reconhecida e independente.

Tabela 36 – Comparação de impactes ambientais por unidade funcional (1 m<sup>2</sup> de ladrilho) com outros publicados na bibliografia

Categoria de impacte	Unidades	Bovea et al. (2010)	Ibáñez-Forés et al. (2011)		Ibáñez-Forés et al. (2013)	Benveniste et al. (2011)		Rós et al. (2017)		Tikul e Srichandr (2010) *	Hansen et al. (2010)	Han et al. (2015)	
Tipo de abordagem de ACV	--	Berço ao portão	Berço ao portão	Berço ao túmulo	Berço ao portão	Berço ao túmulo	Berço ao túmulo	Berço ao portão	Berço ao túmulo	Berço ao portão	Berço ao portão	Berço ao portão	Berço ao túmulo
Método de avaliação de impactes	--	CML 2001	CML 2001	CML 2001	CML 2001	CML 2001	CML 2001	CML 2002		EDIP	CML	CML 2001	
Cobertura geográfica	--	Castellon	Espanha	Espanha	Espanha	Espanha	Espanha	Espanha		Tailândia	Brasil	China	
Ano recolha		2004–2006	2009		2009		2008		2010-2015				
Tipo de ladrilho	--	Pavimento e revestimento	Todos os tipos (mínimo)	Todos os tipos (máximo)	Grés vidrado	Grés porcelânico	Ladrilhos vidrado	Porcelanato (26 empresas)		Ladrilhos vidrado	Porcelanato vidrado	Fachada cerâmica (revestimento)	
Tipo de cozedura		A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A (extrusão)	
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	8,46E+00	8,70E+00	1,80E+01	6,10E+00	1,80E+01	1,70E+01	9,48E+00	1,11E+01	3,93E+01	7,90E+01	3,11E+01	7,07E+01
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	5,32E-02	2,85E-02	6,87E-02	4,50E-02	7,90E-02	7,00E-02	2,94E-02	4,50E-02	1,09E-01	3,02E-02	1,34E-01	5,23E-01
EP	kg PO <sub>4</sub> eq	2,28E-03	3,80E-03	9,35E-03	1,70E-03	9,60E-03	9,10E-03	4,00E-03	6,01E-03	n.d.	4,18E-03	2,29E-02	1,17E-01
ODP	kg CFC-11 eq	2,49E-07	9,48E-07	2,12E-06	6,50E-07	2,10E-07	1,70E-07	6,46E-07	7,13E-07	3,01E-6	n.d.	9,37E-07	2,83E-06
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3,75E-03	1,16E-03	3,16E-03	1,70E-03	2,00E-02	2,00E-02	2,29E-03	3,62E-03	1,14E-2	1,50E-3	4,15E-03	1,92E-02
Adf	MJ eq	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3,00E+02	2,90E+02	1,21E+02	1,39E+02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
ADe	Kg Sb eq	4,47E-02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1,00E-04	1,67E-04	n.d.	9,31E-02**	1,65E-04	5,44E-04

Fonte: adaptado de Almeida *et al.*, 2016 \* convertidos para 1m<sup>2</sup> (no trabalho original em Mg); n.d. – não disponível ; \*\* método distinto  
Tecnologia de cozedura – A = Monocozedura; B = Bicozedura

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela 37 – Comparação de impactes ambientais por unidade funcional (1 m<sup>2</sup> de ladrilho) publicado em DAPs de ladrilho

Categoria de impacte	Unidades	Industrieverband Keramische Fliesen und Platten e.V. (a)	Tile Council of North America (TCNA) (2014) (b)		Confindustria (2016) (c)	
Norma de referência	--	ISO 14025	ISO 14025		EN 15804+A1	EN 15804+A1
Tipo de ACV	--	Berço ao portão	Berço ao portão	Berço ao túmulo	Berço ao portão	Berço ao túmulo
Método de avaliação de impactes	--	CML 2001	CML 2001 (2013)		CML (2013)	CML (2013)
Cobertura geográfica	--	Alemanha	América Norte e México		Itália	Itália
Cobertura temporal		2008/2009	2012		2014	
Tipo de ladrilho	--	Pavimento e revestimento (prensado e extrudido)	Pavimento (prensado e extrudido) e revestimento		Pavimento e revestimento (maioria prensado e algum extrudido)	
Representatividade		12 instalações	11 instalações		87 instalações	
Peso específico	--	15,1 kg/m <sup>2</sup>	18,1 kg/m <sup>2</sup> (17-34,2 kg/m <sup>2</sup> )		19,91 kg/m <sup>2</sup>	
Tecnologia de cozedura		A+B	A	A	A+B	n.d.
Vida útil de referência (anos)		50	60		Mais de 60	
GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	9,7E+00	1,31E+01	1,51E+01	1,05E+01	1,43E+01
AP	kg SO <sub>2</sub> eq	2,0E-02	4,96E-02	5,65E-02	2,47E-02	3,36E-02
EP	kg PO <sub>4</sub> eq	1,9E-03	4,62E-03	6,04E-03	2,75E-03	4,15E-03
ODP	kg CFC-11 eq	4,7E-07	7,13E-10	8,11E-10	6,10E-10	6,66E-10
POCP	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,6E-03	4,61E-03	5,20E-03	2,37E-03	2,94E-03
ADf	MJ eq	1,7E+02	1,95E+02	2,19E+02	1,57E+02	1,89E+02
ADe	Kg Sb - eq	9,9E-05	1,04E-05	1,22E-05	9,19E-05	1,07E-04

Tecnologia de cozedura – A = Monocozedura; B = Bicozedura; n.d. – não disponível; a = Associação Alemã; b= Associação americana; c= Associação italiana

Os resultados obtidos neste estudo são consistentes com os resultados obtidos noutros estudos referentes a ladrilhos cerâmicos, como os desenvolvidos nos grandes produtores mundiais como seja Itália (Nicoletti et al., 2002), na Espanha (Benveniste et al., 2011; Fullana-i-Palmer, 2011; Ibáñez-Forés et al., 2013, 2011; Ros-Dosdá et al., 2018), China (A. Geng et al., 2017; Han et al., 2015), Tailândia (Tikul and Srichandr, 2010) e em Portugal pelo autor desta tese (Almeida et al., 2016b, 2016a, 2014b, 2013b, 2012), onde a etapa do berço-ao-portão (A1-A3) apresenta a maior contribuição para grande parte das categorias de impacto analisadas devido principalmente ao consumo de energia significativo, às atividades desenvolvidas na fábrica, à tipologia e transportes de matérias-primas.

Benveniste et al. (2011) apontou também a etapa de uso como a mais significativa para a formação de ozono fotoquímico (cerca de 65%), eutrofização (cerca de 43%) (afim ao presente estudo) e consumo de água (cerca de 70%) (análogo ao determinado para a depleção da água no presente estudo). As diferenças de resultados podem ser explicadas pelo tipo de agente de limpeza (não identificado no estudo espanhol) usado para lavar os pavimentos e a frequência de limpeza (maior do que a considerada no presente estudo).

Os estudos de Almeida et al. (2010, 2013), Benveniste et al. (2011), Ibáñez-Forés et al. (2011, 2013) e Rós-Dosdá et al. (2017) referem ainda que o processo unitário de cozedura é o mais relevante na etapa do berço ao portão para as categorias avaliadas nomeadamente aquecimento global, acidificação e oxidação fotoquímica devido ao consumo energético elevado. Já Almeida et al. (2016) refere que a etapa do berço ao portão influencia também as partículas (PM 2.5) para além das categorias mencionadas.

Utilizando o método Eco-indicator, Nicoletti et al. (2002) concluíram também que, além da cozedura (37% a 50%), a preparação de pasta e a fusão da frita foram as mais relevantes respetivamente para acidificação e toxicidade humana no pavimento italiano. Este facto é também consistente com os presentes resultados, embora para a acidificação a produção de eletricidade (mix Português) seja a principal fonte nos pavimentos em ciclo completo (27-31% dos resultados do berço ao portão), já nos em ciclo parcial é a produção de matérias-primas e auxiliares (41-47%), enquanto no pavimento italiano a cozedura representa 41% e a preparação de pasta 22% para a acidificação.

Ao comparar os estudos de Benveniste et al. (2011), Bovea et al. (2010) e Ibáñez-Forés et al. (2011, 2013), utilizando o método CML 2001 (uma versão de fatores de caracterização anterior à usada no presente trabalho) e Rós-Dosdá et al. (2017) com CML 2002, os valores absolutos obtidos (Tabela 36) para aquecimento global, eutrofização e depleção da camada de ozono estão na mesma ordem de grandeza, embora os resultados em Portugal tenham sido mais elevados (talvez explicados pelo transporte de matérias-primas que é bem superior). Já a depleção de recursos fósseis é semelhante, enquanto para a acidificação e oxidação fotoquímica, os valores portugueses são mais baixos em alguns ladrilhos (talvez relacionados com um mix de eletricidade e/ou composição de gás natural mais favorável,



e/ou a existência de sistemas de depuração de gases da combustão na cozedura). As restantes categorias de impacto não foram abordadas nos referidos estudos espanhóis.

Efetivamente Bovea et al. (2010) e Ibañez-Forés et al. (2011, 2013) reportaram distâncias de transporte de matérias-primas (principalmente pasta atomizada) e esmalte/vidrados bastante inferiores (média de 20 km) aos verificados nos estudos de caso portugueses (onde a maioria das argilas e os esmaltes/vidrados foram importados do estrangeiro). Estas causas, para além da tipologia de ladrilhos estudados em Espanha (incluem o pavimento e revestimento, sendo que este último requer em média menos energia) podem também explicar as diferenças nos resultados obtidos nas categorias de impacto.

Rós-Dosdá et al. (2017) estudou o porcelanato vidrado e não vidrado produzido em Espanha, equiparado às amostras PC1, PC2 e PC3 deste estudo, tendo concluído que os principais responsáveis pelos impactos são a etapa de produção, consumo de energia e extração de matérias-primas e auxiliares. Adicionalmente referem a importância da espessura do material, vidrado (principalmente na depleção de recursos elementos e eutrofização) e dos tratamentos mecânicos (depleção da camada de ozono), conclusões afins às do presente estudo exceto depleção da camada de ozono, referindo mesmo que os menores impactos estão associados às menores espessuras, ausência de vidrado e de tratamento mecânico subsequente. Os valores absolutos obtidos estão na mesma ordem de grandeza porém inferiores aos obtidos em PC1, PC2 e PC3, exceto depleção de recursos elementos que é mais favorável nos ladrilhos nacionais, sendo que a eutrofização e a oxidação fotoquímica são muito semelhantes. As diferenças poderão ser explicadas, como mencionado para os outros estudos espanhóis, pelas distâncias superiores de transporte de matérias-primas e vidrados em Portugal (importados de Espanha e Turquia maioritariamente), uso de cogeração em Espanha e cenários de distribuição, uso e fim de vida. Recomendam ainda a quantificação das partículas como fluxo de saída nas DAPs (EN 15804+A1:2013) (Almeida et al., 2016b, 2016a, 2014b).

Adicionalmente Bribián et al. (2011) concluiu que o processo unitário mais relevante diz respeito ao elevado consumo energético na cozedura durante a fabricação de pavimentos cerâmicos (mais de 80%, semelhante ao obtido nos casos em estudo), tendo obtido um valor de consumo de energia (NRE - 312,98 MJ/m<sup>2</sup>) na mesma ordem de grandeza do presente estudo (ADf), embora um pouco maior (exceto PE5), enquanto o resultado para o aquecimento global (17,14 kg/m<sup>2</sup>) é menor do que o obtido nestes estudos de caso, mas semelhante a VC10 (pavimento vermelho). No entanto, aquele estudo é omissivo relativamente a dados de inventário da ACV ou mesmo detalhes do processo de fabrico ou da tipologia de pavimento cerâmico em estudo, bem como cenários usados no transporte e uso, como mencionado em 3.2.3. Estes autores salientaram também a importância de utilizar matérias-primas (argilas, etc.) locais, referindo que a produção de pavimento de base vermelha utiliza matérias-primas locais espanholas, enquanto a de pavimento de base

branca utiliza matérias-primas de origem estrangeira ou seja materiais importados, resultando assim no aumento de cerca de 1,6 do consumo de energia e de emissões, o que também se verifica para algumas categorias de impacto deste estudo nacional (GWP, EP, ADe, ADf, PM2.5, WD), atingindo mesmo o rácio de 1,7.

Já um estudo tailandês (Tikul and Srichandr, 2010), com uma abordagem do berço ao portão, usando o método do EDIP, concluiu que o transporte das matérias-primas, nomeadamente as do estrangeiro, é o processo mais relevante, seguindo-se também os processos tecnológicos utilizados na cerâmica. Foi estudado um pavimento de grés branco com um peso médio de 10,57 Kg/m<sup>2</sup>, fabricado por um processo de bicozedura (cozedura em 2 estágios: chacota e depois vidrado), a operar com GPL. Verifica-se que o aquecimento global e a acidificação apresentam valores de duas a três vezes superiores tal como a oxidação fotoquímica (4 a 6 vezes superior à nacional), facto provavelmente justificado pela tecnologia de bicozedura (cozedura do mesmo material duas vezes, originando maiores emissões de gases de combustão como o CO<sub>2</sub>, partículas de SO<sub>2</sub>, como se infere do inventário apresentado) e transporte de matérias-primas. Recorde-se que nos estudos de caso nacionais a tecnologia é de monocozedura (MTD do sector) com menores necessidades térmicas face à bicozedura.

Numa ACV do berço ao portão nos EUA, Curran et al. (2002), obteve um valor de 8,06E+02 kgCO<sub>2</sub>-eq/Mg, ligeiramente superior aos nacionais que variam de 5,55E+02 a 7,88E+02 kgCO<sub>2</sub>-eq /Mg, porém para a acidificação o valor obtido de 3,07E+02 kg H<sup>+</sup> moles-eq/Mg é bem superior aos da acidificação nacional que variam de 2,24 a 3,14 kg H<sup>+</sup> moles-eq/Mg. Os resultados nacionais refletem um mix energético que tem evoluído favoravelmente, bem como o uso de combustíveis com teor muito residual de enxofre ou mesmo inexistente e a existência de filtros associados às operações de cozedura.

Na China, o maior produtor de ladrilhos, Li et al. (2008) determinaram um valor de 1620 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg (sem especificar método de AICV), que é 10 vezes superior ao máximo obtido no presente estudo, explicado pelos processos tecnológicos menos eficientes, o combustível usado (fuel e gasóleo, cujos fatores de emissão de CO<sub>2</sub> são superiores, influenciando o aquecimento global). No entanto, noutro estudo de ladrilho chinês foi reportado nos dados de inventário do processo de fabrico (correspondente apenas ao módulo A3) o valor de 298 kg CO<sub>2</sub>-eq/Mg (Kuhtz et al., 2010), com o uso de fuelóleo pesado, gasóleo e gás natural, o que representa um valor superior aos nacionais mas na mesma ordem de grandeza, explicados pela natureza do combustível utilizado. Ainda um outro estudo chinês (A. Geng et al., 2017) refere uma depleção de recursos fósseis de 200,48 MJ/m<sup>2</sup> e um aquecimento global de 18,86 kg CO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup> para a etapa do berço ao portão, o que é coerente com os resultados apresentados neste estudo, porém não apresenta informação adicional para que se possa efetuar uma explicação de resultados. Neste contexto, poderemos verificar uma evolução positiva em termos de desempenho

ambiental (aquecimento global) do ladrilho fabricado na China ao longo do tempo, explicado quer pela evolução tecnológica (bicozedura para monocozedura) quer pelos combustíveis (de carvão, fuel e coque para gás natural). Os resultados de Han et al. (2015) são para revestimentos da China, pelo que serão discutidos no próximo capítulo.

No que se refere ao Brasil, Hansen et al. (2010) efetuaram a ACV de porcelanato branco esmaltado fabricado por via húmida em ciclo completo, tendo concluído que, aplicando o CML e a base de dados Ecoinvent 2.0, as categorias com maior expressão são o aquecimento global (oriundos da secagem e cozedura na fábrica) e a toxicidade humana (associado principalmente ao transporte de matérias-primas). Os valores obtidos na abordagem do berço ao portão estão alinhados com os obtidos neste trabalho (PC1, PC2 e PC3), embora ligeiramente menores, associado muito provavelmente ao menor peso específico do material brasileiro (19 kg/m<sup>2</sup>) e menores transportes, exceto a depleção de recursos elementos que é bem maior (mas cujo método CML sofreu evolução ou seja dantes incluía recursos abióticos e fósseis, e deverá ser essa a principal justificação).

Já quando se comparam os resultados na abordagem do berço ao portão com os resultados presentes em DAPs de médias sectoriais (Tabela 37), verifica-se que os valores são, em regra, inferiores aos obtidos no presente estudo. Os resultados da DAP da Alemanha (Industrieverband Keramische, 2011) são os melhores para o aquecimento global, acidificação, eutrofização e oxidação fotoquímica, embora semelhantes aos italianos (Confindustria Ceramica, 2016). Já os americanos (TCNA, 2014) estão muito alinhados com os nacionais destacando-se alguns ladrilhos nacionais com melhor desempenho que a média americana.

Os resultados nacionais apresentam valores mais baixos para a categoria de depleção de recursos elementos, um indicador que reflete o uso de matérias-primas (caulinos, feldspatos, argilas e ainda alguns metais utilizados em fritas e em vidros para a etapa da decoração), destacando-se no entanto o uso em Portugal de tecnologias muito recentes na decoração (impressão digital de alta definição em cerâmica) que minimizam o uso de vidrados. Por outro lado, este indicador tem sofrido atualização na metodologia de cálculo por parte do método CML (Leiden University, 2012). Os restantes resultados nacionais, apesar de superiores possuem uma ordem de grandeza similar, exceto a depleção da camada de ozono que é bastante superior, embora esta categoria esteja associada a arrefecimentos na produção de energia (eletricidade e combustíveis) e seja muito pouco influenciada pelas atividades desenvolvidas na fábrica.

Uma vez que as tecnologias e fornos usados em Portugal provêm maioritariamente de fornecedores italianos e alguns equipamentos são de origem alemã a explicação para este desempenho distinto poderá estar associado ao mix de produtos, que quer a DAP italiana quer a Alemã apresentam. Assim, estas DAPs representam gamas de produto muito distintas, incluindo revestimentos que usualmente possuem espessuras mais finas, que são

cozidos a temperaturas inferiores e por conseguinte consomem menos energia e emitem menos poluentes como CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e COV's que contribuem para as categorias como aquecimento global, acidificação, eutrofização e oxidação fotoquímica. De mencionar o peso específico de 15,1 kg/m<sup>2</sup> para o ladrilho alemão o que indicia revestimentos ou pavimentos comuns e menos associados a grés porcelânico.

Também a origem e transporte das matérias-primas e auxiliares poderá justificar o melhor comportamento, já que em Portugal se recorre a vidros e corantes estrangeiros (não existem produtores nacionais), bem como a uma percentagem significativa de caulinos, feldspatos e algumas argilas, com origem em Inglaterra, Turquia e Espanha.

Quando a comparação é efetuada em massa (kg) (através da densidade média dos pavimento) verifica-se uma maior proximidade dos resultados nacionais principalmente com os da Alemanha e mesmo com os italianos (com menor variação).

A comparação do berço ao túmulo poderá ser mais limitada uma vez que os cenários de distribuição, limpeza na etapa de uso e fim de vida não são coincidentes. Assim, os valores nacionais são os mais elevados face aos registados por Itália e América, com um especial enfoque para a etapa de transporte que no caso nacional foi para um cenário de 1000 km por transporte rodoviário enquanto no caso americano foi de cerca de 800 km e no caso italiano apresentou um mix mais favorável pois conjugou um cenário de transporte (nacional com 300 km para 51% da produção, europeu com 1390 km para 34% da produção e os restantes 6520 km por navio transoceânico). Também a DAP italiana apenas apresenta os impactes da limpeza para um ano, enquanto os resultados deste trabalho refletem a limpeza em 50 anos. O fim de vida apresenta também condições mais favoráveis na DAP italiana com a deposição em aterro num raio de 20-30 Km.

As restantes categorias de impacte avaliadas no presente estudo (HTc, HTnc, LU, WD, PM2.5 e ET) não foram abordadas em nenhuma das DAPs estudadas.

#### **4.3.3.4 Potenciais medidas de melhoria do impacte ambiental**

De modo a melhorar o impacte ambiental ao longo do ciclo de vida do pavimento cerâmico serão estudadas um conjunto de medidas que podem promover a eficiência energética e a minimização de emissões atmosféricas, nomeadamente para os pontos críticos ("hotspot") identificados na abordagem do berço ao portão (A1-A3). Assim, sendo a cozedura um dos pontos críticos, a redução de impactes neste processo poderá ser alcançada através de medidas que conduzam a uma redução do consumo de combustível nesta operação e consequentemente diminuam os poluentes atmosféricos como sejam o CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, HF, HCl e respetivas contribuições para as categorias de impacte.

Neste contexto, e embora as medidas em estudo sejam potencialmente aplicáveis a todos os pavimentos, estas serão avaliadas para o PC2, por ser um produto considerado de maior valor acrescentado neste subsector (porcelanato), utilizar a conformação por prensagem (processo mais usual) e apresentar os maiores impactes ambientais em grande parte das categorias em estudo.

Algumas das medidas propostas incluem as preconizadas nas políticas atuais, tais como o rótulo ecológico da UE de acordo com os critérios estabelecidos na Decisão 2009/607/CE (Comissão Europeia, 2009b) para revestimentos duros e as melhores técnicas disponíveis (MTD) (European Commission, 2007) no âmbito aplicação da Diretiva da UE sobre Emissões Industriais (Comissão Europeia, 2010c) transposta para o Regime das Emissões Industriais de acordo com o Decreto-Lei n.º 127/2013, de 30 de agosto.

As medidas são avaliadas no que se refere à sua eficácia na redução de impactes ambientais e, pela sua natureza e relevância, são aplicadas na abordagem do berço ao portão, a mais representativa para a maioria das categorias de impacto. Estas medidas de melhoria estão relacionadas com os “hotspots” e trabalhos desenvolvidos pelo autor no âmbito desta tese (Almeida et al., 2016b), tendo sido atualizadas para o desempenho do PC2 no ano de 2015, podendo-se categorizar em:

- A) medidas a implementar na fábrica cerâmica (local de produção) (IA1 ou IA2, IA3 e IA7);
- B) medidas relativas à minimização do transporte de matérias-primas (IA5);
- C) medidas que combinam as duas categorias anteriores (IA4, IA6 e IA8).

As ações/medidas de melhoria são as seguintes:

- IA1 - consiste na recuperação do ar quente da zona de arrefecimento do forno de rolos para a sua posterior reutilização nos queimadores localizados na zona de pré-aquecimento do forno. Esta medida visa reduzir o consumo de combustível (gás natural) em 12% e as consequentes emissões atmosféricas e é considerada uma MTD (European Commission, 2007) de acordo com o documento de referência para a indústria cerâmica (European Commission, 2007).
- IA2 - consiste na recuperação de ar quente da zona de arrefecimento do forno de rolos para reutilização nos secadores, reduzindo deste modo o consumo de gás natural nos secadores e as emissões atmosféricas associadas. É uma medida alternativa à IA1 e também constitui uma MTD (European Commission, 2007).
- IA3 - inclui a substituição dos sistemas de iluminação na fábrica por outros mais eficientes (ex. LED), com o objetivo de reduzir o consumo de eletricidade em 10%.
- IA4 - inclui a implementação conjunta das medidas IA1 e IA3, atendendo à viabilidade técnica da conjugação destas duas medidas, uma vez que ambas

podem ser integradas na fábrica e todos os elementos envolvidos estão disponíveis no mercado.

- IA5 - inclui a substituição de matérias-primas importadas (argilas, feldspatos, caulinos) oriundas de Espanha e de França (transportes rodoviários) por materiais portugueses. Esta medida visa a minimização de impactes ambientais, reduzindo a distância de transporte percorrida por camião, apesar de não avaliar a qualidade técnica e as possibilidades estéticas para o produto.
- IA6 - é a combinação das medidas IA4 e IA5. Este cenário foi estudado porque é tecnicamente viável implementar estas medidas que são complementares.
- IA7 - considera a adoção do desempenho ambiental mínimo estipulado pelos critérios do rótulo ecológico da UE (Decisão 2009/607/CE (Comissão Europeia, 2009b)). Esta decisão inclui critérios associados principalmente ao local de produção, nomeadamente valores de emissão mínimos para o processo de cozedura, que foram usados para simular o desempenho do PC2 no cenário da medida IA7 (ver Tabela 38). A implementação desta ação de melhoria na instalação fabril implicaria a utilização de uma série de medidas, tais como a recuperação do excesso de ar quente (calor) dos fornos, principalmente a partir da sua zona de arrefecimento (semelhante ao mencionado para a IA1 ou IA2), otimização da curva de aquecimento e equipamento de tratamento de efluentes gasosos complementar (filtros de adsorção em cascata com maior eficiência ou filtros de manga com reagente) para diminuir a concentração das emissões dos diversos poluentes para o ar, nomeadamente fluoretos, cloretos e partículas. A instalação onde se fabrica PC2 possui já filtros de adsorção em cascata com carbonato de cálcio, mas teriam ainda de ser otimizados com mais reagente em módulos adicionais para alcançarem o desempenho pretendido. No que diz respeito às emissões para a água, o PC2 cumpre já com os limites estabelecidos pelo rótulo ecológico da EU (Decisão 2009/607/EU), pelo que não são sugeridas medidas adicionais.
- IA8 - é a combinação das medidas IA7 e IA5, e consiste no cenário mais favorável possível de medidas que promovem o melhor desempenho ambiental para o pavimento PC2, embora seja o mais dispendioso.

A Tabela 39 apresenta o retorno simples (payback), definido como o período de tempo necessário para recuperar o investimento inicial (divisão dos custos iniciais de investimento pela poupança anual de custos energéticos / ambientais). Estes valores foram estimados com base numa consulta ao mercado e em referências bibliográficas (Almeida et al., 2016b; Serrano et al., 2009).

*Tabela 38 – Valores de desempenho ambiental mínimos estipulados no rótulo ecológico para o processo de cozedura utilizados na medida IA7*

	<b>Parâmetro / Critério</b>	<b>Valor-limite</b>	<b>Unidade</b>
	Consumo de energia na cozedura	3,5	MJ/kg de produto
	Consumo específico de água	1	l/kg de produto
<b>Emissões para a atmosfera</b>	Partículas (Poeiras)	200	mg/m <sup>2</sup>
	Fluoretos (F <sup>-</sup> )	200	mg/m <sup>2</sup>
	Óxidos de azoto (NO <sub>x</sub> )	2500	mg/m <sup>2</sup>
	Dióxido de enxofre (SO <sub>2</sub> )	1500	mg/m <sup>2</sup>
<b>Emissões para a água</b>	Sólidos suspensos (SST)	40	mg/l
	Cd	0,015	mg/l
	Cr (VI)	0,15	mg/l
	Fe	1,5	mg/l
	Pb	0,15	mg/l

*Tabela 39 – Ações de melhoria (IA), custos de investimento, poupanças anuais e payback*

	<b>Ação/Medida de melhoria (IA)</b>	<b>Investimento (€)</b>	<b>Poupança anual (€/ano)</b>	<b>Payback (ano)</b>
IA1	Recuperação de calor para os queimadores do forno	120 000	40 000	3
IA2	Recuperação de calor para o secador	1 880	1 080	1,75
IA3	Melhoria do sistema de iluminação	18 800	6 373	2,95
IA4	IA1+IA3	121 880	41 080	3
IA5	Substituição do transporte de matérias-primas para nacional	---	20 000	--
IA6	IA4+IA5	121 880	61 080	1,99
IA7	Desempenho ambiental de acordo com os critérios do rótulo ecológico	350 000	35 000	10
IA8	IA7+IA5	350 000	55 000	6,36

Com base na análise da Tabela 39, pode-se concluir que de IA1 a IA6 são medidas economicamente rentáveis, uma vez que os períodos de retorno do investimento são inferiores ou iguais a 3 anos e os componentes necessários para a sua implementação estão disponíveis no mercado. As duas medidas restantes (IA7 e IA8) têm períodos de reembolso mais longos, logo são menos atrativas.

A Tabela 40 apresenta a quantificação da redução do impacto ambiental (expressa em %) em relação ao desempenho inicial do PC2 para todas as ações de melhoria sugeridas (cenários).

*Tabela 40 – Percentagem de redução alcançada por unidade funcional (1 m<sup>2</sup>)*

<b>Categoria de impacte - redução (%)</b>	<b>IA1</b>	<b>IA2</b>	<b>IA3</b>	<b>IA4</b>	<b>IA5</b>	<b>IA6</b>	<b>IA7</b>	<b>IA8</b>
GWP	3,6	1,5	1,7	5,3	5,6	10,9	7,0	12,6
AP	1,8	0,9	3,0	4,9	5,0	9,8	8,4	13,7
EP	1,2	0,5	2,7	3,9	10,1	14,0	6,3	16,2
ODP	5,2	2,8	0,6	5,8	7,3	13,1	7,7	15,1
POCP	2,7	1,3	2,3	5,1	3,6	8,7	9,1	12,6
ADe	0,1	0,0	1,5	1,6	0,1	1,7	1,6	1,7
ADf	4,7	2,5	1,3	6,0	5,8	11,9	7,8	13,6
HTnc	0,8	0,4	0,9	1,7	25,0	26,8	2,1	27,1
HTc	0,9	0,5	1,9	2,8	2,3	5,1	3,1	5,4
PM 2.5	2,1	0,9	1,8	3,8	7,3	11,2	14,3	20,9
LU	0,0	0,0	1,9	1,9	0,1	2,0	2,0	2,0
WD	0,1	0,0	6,5	6,5	0,9	7,4	6,6	7,4
ET	1,5	0,8	1,6	3,2	28,7	31,8	3,7	32,4
AP+	1,8	0,9	2,9	4,7	5,6	10,3	7,4	12,8
POCP+	2,6	1,3	1,6	4,2	9,0	13,2	7,2	16,0

Da análise da Tabela 40 verifica-se que IA7 (medidas para implementar o desempenho ambiental do rótulo ecológico) e IA5 (substituição de matérias-primas estrangeiras por portuguesas) são as mais eficazes para a redução dos impactos ambientais, em termos do conjunto de medidas individuais (nomeadamente IA1, IA2, IA3, IA5 e IA7). Constatando-se que a medida IA5 é a mais eficaz na redução da eutrofização, toxicidade humana não cancerígena e ecotoxicidade, evidenciando a influência do transporte e a consequente libertação de poluentes. Deve-se notar que o transporte por navio transoceânico da Turquia e da Grã-Bretanha é "ambientalmente eficiente" (face ao transporte rodoviário).

Já IA7, que envolve medidas associadas a poupança energética e redução de poluentes, é a mais eficaz para acidificação, oxidação fotoquímica, partículas, e pegada da água. São medidas aproximadamente equivalentes para as categorias aquecimento global, depleção da camada de ozono e recursos fósseis. São medidas pouco eficazes para a depleção de recursos abióticos (elementos) e uso do solo. Estes resultados corroboram os indicadores previstos no rótulo ecológico da EU (Comissão Europeia, 2009b), que abordam a etapa de fabrico, com especial enfoque para a operação de cozedura. Estes resultados são também coerentes com os apresentados noutros estudos em Espanha (Bovea et al., 2010), que



analisaram medidas semelhantes às ações preconizadas em IA1 e IA2 tendo registado melhorias de impactes de 2,1% (caso da eutrofização) até 11,8% (para a acidificação), para as primeiras seis categorias referidas na Tabela 40 (GWP, AP, EP, ODP, POCP, ADe) usando também o método CML (Guinée et al, 2001) (embora uma versão anterior).

Em termos de medidas coletivas (abrangem mais do que uma ação), a medida IA8 assume-se como a mais eficaz na redução de impactes ambientais para todas as categorias em estudo, por muito que numa gama semelhante ao IA6, como seria de esperar uma vez que os critérios estipulados pelo rótulo ecológico para pavimento na cerâmica (Decisão 2009/607/CE), pressupõem a implementação de medidas de redução de consumos energéticos (eletricidade e gás natural) e consequentes emissões atmosféricas, tais como as previstas em IA1, IA2 e IA3.

Finalmente pode-se referir que os impactes ambientais alcançados com as medidas previstas nos cenários IA6 e IA8 revelam resultados semelhantes aos obtidos pelos pavimentos com os melhores desempenhos ambientais (BP9, VC10) (ver tabela A.15 e A.16), apesar de se situarem ainda ligeiramente acima, o que mais uma vez revela que as condições de cozedura, os consumos de energia elétrica e o transporte de material são elementos “chave” na redução de cargas ambientais. Assim, e face à relevância do transporte rodoviário em algumas das categorias de impacto ambiental em estudo (EP, ODP, HTnc, POCP, PM e ET), sugere-se a inclusão de um critério relativo ao transporte de matérias-primas numa futura revisão dos critérios de atribuição do rótulo ecológico para revestimentos de pavimentos de materiais cerâmicos.

Neste âmbito, de forma a melhorar o desempenho ambiental dos materiais cerâmicos propõem-se ainda as seguintes recomendações:

- recurso a matérias-primas sempre que possível locais de forma a minimizar deslocamentos;
- desenvolvimentos de pastas cerâmicas que possam ser sinterizadas a temperaturas mais baixas, por exemplo com recurso a fundentes, e desse modo possam reduzir as necessidades térmicas e consequentes emissões;
- medidas de racionalização energética, incluindo o reaproveitamento de calor de fornos para a secagem (secadores ou atomizadores);
- desenvolvimento de isolamentos térmicos, refratários e outros que possam reduzir as necessidades térmicas na atomização, secagem e cozedura;
- minimizar ou evitar o uso de metais pesados nas decorações e vidrados; uma vez que estes elementos condicionam categorias de impacto como sejam a toxicidade humana, ecotoxicidade e a depleção de recursos abióticos;
- uso de tecnologia de cozedura em monocozedura;

- implementar medidas de eco-design (considerações de pensamento de ciclo de vida em todas as etapas de forma a minimizar impactes, como sejam redução da embalagem (incluindo a gramagem), gestão adequada de recursos minerais, minimizar e otimizar transportes, gestão de recursos energéticos, reaproveitamento de resíduos, etc.);
- implementar estratégias de economia circular de forma a aumentar a eficácia da utilização de recursos (reutilização, reparação, renovação e reciclagem dos materiais e produtos existentes, ou seja, o que era visto como um “resíduo” pode ser transformado num recurso ou matéria-prima secundária, de forma a minimizar impactes nas etapas de extração, produção e fim de vida), bem como recuperações de energia. Reduzindo deste modo a dependência de materiais primários (matérias-primas) e de energia.

#### 4.3.4 Conclusão

Da análise dos resultados e do trabalho desenvolvido no decorrer desta ACV ao pavimento cerâmico, podemos concluir que:

- apesar dos pavimentos poderem ser usados para a mesma função apresentam alguma variabilidade de impactes (de 3% a 93% para ADe), verificando-se no geral que os maiores impactes por unidade funcional ( $m^2$ ) ocorrem para o pavimento em grés porcelânico (PE5, PC1 a PC3), segue-se o pavimento de base branca por prensagem (BC6, BP7, BP8, BP9), e finalmente o pavimento de base vermelha por prensagem (VC10). Esta variabilidade poderá ser relevante quando se realizam estudos de ACV que abrangem médias sectoriais e fundamentam as DAPs sectoriais ou na definição de melhores desempenhos (benchmarks);
- os ladrilhos em ciclo completo e em ciclo parcial (a preparação de pasta realizada no exterior) não apresentam diferenças significativas (em regra inferiores a 15-20%, exceto na depleção da água), o que revela a eficiência das fábricas dedicadas à preparação de pasta. No caso da depleção da água verifica-se que as fábricas em ciclo completo são mais eficientes uma vez que podem reciclar mais água (ex. na secção de preparação de pasta e em lavagens);
- para a maioria das categorias, os impactes estão relacionados com fatores como a tipologia de matérias-primas (e respetivo transporte), a espessura de material produzido (que induz distintas necessidades energéticas), a quantidade de vidro e o tratamento subsequente existente (induz maiores consumos energéticos e/ou água). Já fatores tecnológicos como seja o modo de conformação, condução de forno, entre outros, possuem uma menor influência no desempenho;

- para as categorias associadas à toxicidade humana, ecotoxicidade e à depleção da água verifica-se um padrão distinto, com uma maior associação a fatores como a quantidade de vidrados (e substâncias químicas) e tratamento subsequente (ex. polimento, amaciamento), ambos aplicados por área; ou a existência de processos de recirculação de água;
- a etapa de produto (A1 a A3) (berço ao portão) é a mais significativa (superior a 50% dos impactes globais do ciclo de vida) para todas as categorias de impacto exceto eutrofização, uso do solo, depleção da água e ecotoxicidade, onde a etapa de uso (B) assume um papel preponderante. A etapa da construção (A4-A5) apresenta-se como a segunda ou terceira mais relevante para a maioria das categorias de impacto, devido ao transporte e ainda a aplicação do ladrilho em obra (contributo do cimento-cola e a água). A etapa de fim de vida (C) é a segunda mais relevante apenas para as partículas (PM2.5) associada às atividades de demolição e desconstrução;
- na etapa de produto (A1 a A3) a “produção de matérias-primas e auxiliares” é a mais relevante para categorias depleção de recursos elementos e toxicidade cancerígena e para os ladrilhos em ciclo parcial (GWP, AP, EP, POCP, ADf, WD, PM2.5); a “produção da eletricidade” é o processo dominante para depleção da água e ainda acidificação e oxidação fotoquímica (menos expressivo) mas apenas para ciclo completo; enquanto as “atividades na fábrica” contribuem para o aquecimento global e partículas (PM2.5) em ciclo completo; já “produção de combustíveis” é o maior contribuinte para a depleção da camada de ozono e recursos fósseis; a “produção de embalagem” é dominante para o uso do solo devido ao contributo das paletes de madeira. Finalmente o “transporte” é relevante para a ecotoxicidade e ainda ciclo completo (EP e HTnc);
- as infraestruturas têm pouca relevância para a maioria das categorias de impacto (inferior a 10%), no entanto são importantes para a depleção de recursos elementos, seguindo-se o uso do solo e a toxicidade cancerígena;
- as medidas individuais mais eficazes para a redução de impactes são as ações que conduzem ao desempenho do rótulo ecológico e à redução de distâncias rodoviárias (substituição de matérias-primas estrangeiras por nacionais). A conjugação destas duas medidas assume-se como a mais eficaz das estudadas, porém a mais dispendiosa;
- a acidificação apresenta um comportamento semelhante quando determinada pelo CML-IA e ILCD, enquanto a oxidação fotoquímica exibe um comportamento distinto já que os métodos apresentam fatores de caracterização e algumas substâncias distintas.

## **4.4 Ladrilhos cerâmicos - revestimento**

O enquadramento desta tipologia de produto foi já efetuado no capítulo 2 e no capítulo 4.3.1, incluindo dados de produção de revestimento cerâmico e a descrição do processo produtivo.

O pavimento e revestimento apresentam o mesmo processo tecnológico de fabrico, a mesma norma de produto, EN 14411 (CEN, 2016), variando nas características finais do produto devido à composição de matérias-primas e aos ciclos de cozedura. Assim, para a produção de revestimento (também designada por “monoporosa”) utiliza-se tipicamente carbonatos (enquanto no pavimento se evitam), a composição percentual das restantes matérias-primas (argilas, caulinos, areias, feldspatos, etc.) pode ser distinta, e os ciclos de cozedura apresentam temperaturas máximas mais baixas (cerca de menos 40º C). As temperaturas e o ciclo de cozedura variam em função da dimensão dos formatos em fabrico e das espessuras do material, de modo a garantir a adequada descarbonatação.

### **4.4.1 Metodologia de ACV**

Seguiu-se também a ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006 (ISO, 2006a, 2006b) como metodologia de ACV, tendo-se adotado a abordagem modular prevista na norma EN 15804+A1:2013 (CEN, 2013).

#### **4.4.1.1 Definição de objetivo e âmbito**

Este estudo de caso pretende identificar e avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida de revestimento cerâmico produzido em Portugal a partir de argilas, caulinos, carbonatos, feldspatos e corantes, entre outros. Foram considerados oito estudos de caso reais representativos dos materiais cerâmicos de revestimento pertencentes ao grupo BIII segundo a EN14411 (CEN, 2016).

Tal como para o pavimento, também para o revestimento cerâmico foram consideradas as duas opções de fabrico: o ciclo completo (todas as operações desenvolvidas na unidade industrial – amostras designadas com a segunda letra “C”) e o ciclo parcial (o processo de preparação da pasta cerâmica, incluindo a atomização executada noutra unidade industrial especializada para esse efeito – amostras com “P”). As amostras representam quer os revestimentos de grande formato quer os de pequeno formato. Foram estudadas sete pastas brancas e ainda uma pasta de base vermelha (VC3), sendo de mencionar que a pasta vermelha é pouco representativa em termos de fabrico em Portugal.

Estes estudos de caso além de serem representativos do revestimento cerâmico produzido em Portugal são também representativos da tecnologia utilizada a nível europeu e mundial. Assim, possuem uma capacidade instalada, matérias-primas e auxiliares, tecnologia usada na conformação (técnica de prensagem e técnica de extrusão, esta última menos frequente em Portugal e no mundo), tipo de cozedura (monocozedura), dimensões do forno, e o gás

natural como combustível (MTD do subsector e o único utilizado em Portugal, embora a nível mundial existiam outros como o GPL mas em minoria), afins aos utilizados na Europa e a nível mundial.

Em termos de objetivos específicos com esta ACV pretende-se:

- a) avaliar impactes ambientais de revestimento cerâmico produzido em Portugal, ao longo do seu ciclo de vida, comparando-os com outros estudos;
- b) indagar se existem diferenças relevantes de impactes ambientais, nos revestimentos em estudo, em função das diferentes tipologias de matérias-primas (pasta de base “branca” e pasta de base “vermelha”);
- c) averiguar se as opções tecnológicas de ciclo completo e de ciclo parcial têm influência na quantificação de impactes ambientais;
- d) quantificar categorias de impacto ambiental adicionais à norma EN 15804+A1 (CEN, 2013) aplicável a produtos de construção;
- e) verificar se o uso de métodos distintos de AICV (CML-IA e ILCD) têm influência nos resultados obtidos para a acidificação e oxidação fotoquímica;
- f) aferir a influência da espessura do material nos resultados por unidade funcional ( $m^2$ ) e por unidade declarada (kg);
- g) identificar áreas e medidas de melhoria de desempenho ambiental, nomeadamente através de instrumentos aplicáveis ao sector (ex. rotulagem ecológica, MTDs), verificando a sua eficácia em termos de redução de impactes;
- h) aferir a influência das infraestruturas (construção de edifícios fabris, maquinaria, equipamentos, etc.) nos resultados da abordagem do berço ao portão (A1-A3).

### 4.4.1.2 Unidade funcional

A unidade funcional definida neste estudo é  $1 m^2$  de revestimento produzido em Portugal, fabricado e disponível para ser expedido para o cliente, para revestir paredes de um edifício num período de 50 anos (baseado na EN 14411 (CEN, 2016)). Esta unidade funcional está alinhada com os principais estudos científicos mencionados no capítulo 3.2.3 (Almeida et al., 2016b; Benveniste et al., 2011; Bovea et al., 2010; Ibáñez-Forés et al., 2013, 2011; Nicoletti et al., 2002; Quinteiro et al., 2014; Tikul and Srichandr, 2010) e outros estudos disponíveis no mercado como sejam as DAPs.

Os resultados serão adicionalmente expressos em massa (kg) (assumida como unidade declarada), uma vez que os produtos em estudo diferem em termos de espessura do material, e pretende-se averiguar a influência deste parâmetro (análise de sensibilidade). Na Tabela 41 apresenta-se o peso específico em cozido de cada um dos oito estudos de caso de revestimento cerâmico.

Tabela 41 – Peso específico do material de revestimento cerâmico

Amostra	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
Peso específico em cozido (kg/m <sup>2</sup> )	16,8	16,4	16,7	16,5	16,1	14,9	13,8	10,8

Conforme se pode verificar, as primeiras amostras de revestimento possuem um peso específico superior às três últimas (variando até cerca 55%). O revestimento possui, em regra, um peso específico menor que o pavimento, uma vez que este último tem de suportar mais cargas.

#### 4.4.1.3 Fronteiras do sistema

Tal como para os restantes estudos de caso, as fronteiras do sistema do revestimento cerâmico, foram definidas tendo por base o modelo de etapas estabelecido na EN 15804+A1 (CEN, 2013) e incluem:

- A1 - extração e processamento de matérias-primas e auxiliares;
- A2 - transporte de matérias-primas e auxiliares;
- A3 - produção do revestimento cerâmico na fábrica;
- A4 - distribuição do ladrilho;
- A5 - processo de instalação do ladrilho cerâmico, com o consequente uso de fixativo (cimento-cola);
- B - etapa de uso do ladrilho que inclui sempre que aplicável a utilização (lavagem com água e detergente), manutenção, reparação, substituição e reabilitação;
- C - etapa de fim de vida do ladrilho (inclui a desconstrução e demolição, transporte, processamento dos resíduos e eliminação final).

Neste contexto são avaliadas todas as etapas do ciclo de vida, isto é segue-se uma abordagem do berço ao túmulo (cradle-to-grave), conforme Figura 75, já apresentada para o pavimento.

É de destacar que a produção do revestimento cerâmico na fábrica (A3) possui os mesmos processos unitários já descritos para o pavimento (item 4.3.2.3), possuindo as particularidades já descritas, nomeadamente em termos de matérias-primas (com composição ponderal distinta e mais o carbonato de cálcio), curva de cozedura e espessura do material. De mencionar que todos os estudos de caso possuem sistemas de tratamento de águas residuais, no entanto apenas metade (RC1, RP4, RP5 e RP6) estão munidas de sistemas de tratamento de efluentes gasosos dos fornos (sistemas de adsorção em leito de brita calcária para precipitar o ácido fluorídrico e clorídrico presente nas emissões gasosas, bem como de forma residual o SO<sub>2</sub> e metais, onde o efluente flui em contracorrente de

baixo para cima enquanto o adsorvente cai por gravidade de cima da câmara). Todas as instalações dos estudos de caso dispõem de sistemas de despoeiramento com filtros de manga para as operações de receção e preparação de matérias-primas, bem como na conformação. Tal como para o pavimento, o gás natural é o único combustível usado nos processos térmicos de fabrico, já o gasóleo é utilizado em vários transportes internos como sejam os empilhadores e a pá carregadora, e nos geradores de emergência; o GPL pode ser utilizado nos empilhadores mas também em garrafas na operação de embalagem (particularmente para efetuar as designadas meias paletes). O gás natural representa 94% a 95%, e quer o gasóleo quer o GPL contribuem de 1% a 3%.

Na etapa A4 o cenário de transporte foi o mesmo aplicado para o pavimento cerâmico, ou seja transporte por camião em estrada para a distância total de 1000 km. Também na etapa A5 foi utilizado o mesmo cenário, ou seja 3,5 kg de cimento para cada 1 m<sup>2</sup> de ladrilho, bem como perdas de ladrilho cerâmico em obra de cerca de 3%.

Já na etapa B de utilização do revestimento cerâmico, nomeadamente nas operações de limpeza / manutenção com o uso de água e detergente (sabão), o cenário foi semelhante mas com uma periodicidade distinta de 1 vez a cada 2 meses. A etapa C seguiu as mesmas premissas enumeradas para o pavimento cerâmico, ou seja deposição em aterro.

Foram excluídas das fronteiras do sistema, a produção e manutenção de bens de capital, tais como edifícios, maquinaria, equipamentos, etc. No entanto, apresenta-se o contributo que estas poderão ter, nos resultados da abordagem do berço ao portão (A1-A3), considerando os dados de inventário contidos na base de dados Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014).

#### **4.4.1.4 Inventário do ciclo de vida**

Os dados associados aos módulos de extração (A1), transporte de recursos para a unidade de produção (A2) e produção do pavimento cerâmico (A3) foram recolhidos junto dos fabricantes através de uma ficha de recolha de dados e são representativos do ano de 2015. A validação de dados incluiu balanços de massa, comparação com fatores de emissão disponibilizados no documento de referência da indústria cerâmica BREF CER (European Commission, 2007), com dados de anos anteriores do período de 2010 a 2014, com trabalhos previamente publicados. Esta metodologia foi relevante para validar a coerência, representatividade e precisão destes dados. As fontes de dados foram semelhantes às já apresentadas para o pavimento (ver Tabela 31 no item 4.3.2.1).

Os dados de inventário de entrada e de saída para a etapa de produto referentes à produção de 1 m<sup>2</sup> de revestimento cerâmico constam da Tabela 42 e da Tabela 43 respetivamente. Já na Tabela 44 consta a distribuição percentual do consumo de gás natural no processo produtivo (módulo A3).

Tabela 42 – Dados de inventário para a produção de 1 m<sup>2</sup> de revestimento (entradas)

Entradas	Unidades	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
Argilas	kg	3,06E+00	9,61E+00	1,52E+01	--	--	--	--	--
Bentonite	kg	--	--	--	--	--	--	--	--
Caulino	kg	6,05E+00	2,10E+00	1,02E-01	--	--	--	--	--
Calcário	kg	1,90E+00	2,74E+00	1,10E+00	1,00E-03	1,10E-03	1,03E-03	--	--
Dolomite	kg			1,61E-02	--	--	--	--	--
Feldspato	kg	2,20E+00	2,53E+00	6,00E-01	--	--	--	--	--
Corante	kg	--	--	5,38E-03	1,33E-04	1,36E-05	1,38E-04	2,18E-04	1,18E-04
Vidros	kg	6,32E-01	6,02E-01	6,85E-01	6,83E-01	5,87E-01	7,14E-01	5,34E-01	6,17E-01
Engobes	kg	3,78E-01	3,94E-01	3,50E-01	3,14E-01	3,20E-01	4,03E-01	2,85E-01	3,43E-01
Aditivos	kg	--	--	1,00E-06	1,30E-05	--	1,38E-05	1,00E-05	1,18E-05
Silicato de sódio	kg	3,69E-02	9,94E-02	1,00E-02	--	--	--	--	--
Areia	kg	4,03E+00	2,92E+00	8,00E-01	--	--	--	--	--
Pó atomizado	kg	--	--	--	1,79E+01	1,76E+01	1,64E+01	1,51E+01	1,18E+01
Resíduos e subprodutos (ex. caco crú, poeiras)	kg	1,49E+00	5,57E-01	8,35E-01	--	--	--	--	--
Refratário	kg	4,10E-03	3,30E-03	3,00E-03	1,90E-04	4,00E-03	2,90E-04	3,90E-03	2,90E-03
Água consumida (furo)	m <sup>3</sup>	1,80E-02	1,40E-02	2,85E-02	2,10E-02	1,90E-02	3,18E-02	1,70E-02	1,99E-03
Eletricidade	kWh	4,99E+00	5,11E+00	3,69E+00	2,58E+00	3,10E+00	2,52E+00	1,34E+00	1,07E+00
Gás natural	GJ	8,70E-02	9,30E-02	1,02E-01	6,10E-02	6,83E-02	6,02E-02	4,85E-02	3,07E-02
Gasóleo	MJ	1,07E+00	1,12E+00	4,10E-01	2,74E+00	1,06E+00	1,85E-01	1,01E+00	3,00E-03
Gás propano liquefeito	kg	2,43E-03	1,40E-04	5,40E-03	1,07E-04	2,43E-03	1,03E-04	--	--
Material de embalagem: cartão	kg	1,81E-01	1,51E-01	1,54E-01	1,28E-01	1,85E-01	1,10E-01	1,80E-01	7,10E-02
Material de embalagem: filme plástico	kg	3,20E-02	2,90E-02	2,50E-02	4,15E-02	5,00E-02	4,15E-02	5,00E-02	3,50E-03



## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela 42 – Dados de inventário para a produção de 1 m<sup>2</sup> de revestimento (entradas) (continuação)

Entradas	Unidades	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
Material de embalagem: cinta	kg	3,90E-03	3,00E-03	4,21E-05	3,87E-03	4,20E-03	3,00E-03	4,00E-03	1,00E-06
Material de embalagem: madeira	Número	3,86E-02	3,66E-02	1,91E-02	1,93E-02	3,20E-02	1,80E-02	3,50E-02	2,90E-02
<i>Materiais de manutenção</i>									
Acetileno	kg	7,10E-05	6,80E-05	6,00E-05	1,65E-05	5,60E-05	5,80E-05	5,00E-05	1,00E-05
Oxigénio	kg	3,50E-05	3,40E-05	2,00E-05	1,63E-05	2,00E-05	3,00E-05	2,00E-05	1,00E-05
Óleo de lubrificação	kg	7,10E-05	6,80E-05	6,00E-05	1,65E-05	5,60E-05	5,80E-05	5,00E-05	1,00E-05
<i>Transportes de matérias-primas:</i>									
Transporte: barco	tkm	1,00E+01	1,10E+00	--	--	--	--	--	--
Transporte: camião 16-32 t	tkm	5,00E+00	1,77E+00	2,10E+0	2,61E+00	3,11E+00	2,53E+00	2,28E+00	2,78E+00
Transporte: comboio	tkm	6,00E-02	--	5,12E+00	--	--	1,00E-02	1,00E-02	1,10E-02
--não aplicável									

Tabela 43 – Dados de inventário para a produção de 1 m<sup>2</sup> de revestimento (“saídas”)

Saídas	Unidades	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
<i>Emissões para o ar:</i>									
PM<10	kg	1,99E-03	2,14E-03	2,08E-03	2,45E-03	5,31E-03	3,68E-03	5,19E-05	1,54E-03
PM>10	kg	3,50E-04	3,78E-04	3,68E-04	4,32E-04	9,36E-04	6,50E-04	9,15E-06	2,72E-04
CO <sub>2</sub>	kg	6,06E+00	6,03E+00	6,02E+00	4,68E+00	4,64E+00	4,11E+00	3,78E+00	2,70E+00
HF	kg	2,37E-05	5,00E-04	1,72E-04	2,58E-05	2,31E-04	5,86E-04	9,15E-05	1,37E-04
HCl	kg	2,08E-05	7,16E-04	5,02E-04	5,82E-05	6,38E-06	5,00E-05	1,41E-03	2,81E-05
CO	kg	3,10E-03	1,18E-03	8,41E-03	1,21E-02	7,80E-03	8,52E-03	2,67E-04	9,45E-03

Tabela 43 – Dados de inventário para a produção de 1 m<sup>2</sup> de revestimento (“saídas”) (continuação)

Saídas	Unidades	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
NOx	kg	5,95E-04	7,83E-03	8,22E-03	5,97E-03	6,86E-03	3,65E-03	1,17E-03	2,34E-03
COVNM	kg	1,42E-03	5,00E-03	1,69E-03	6,42E-04	1,46E-03	1,83E-03	1,60E-04	3,21E-03
SOx	kg	2,09E-05	5,98E-03	4,74E-04	2,00E-04	2,00E-05	1,00E-04	5,55E-03	2,06E-06
Cd	kg	1,58E-08	5,34E-09	1,30E-07	4,94E-07	4,62E-07	8,37E-08	1,17E-06	6,06E-08
Cr	kg	6,19E-08	3,16E-05	6,06E-07	2,14E-05	1,63E-06	5,58E-07	2,29E-07	6,06E-08
Ni	kg	8,61E-08	4,31E-06	1,20E-06	1,36E-05	3,10E-06	5,58E-07	1,00E-05	6,06E-08
Pb	kg	7,12E-08	3,56E-06	3,76E-05	7,94E-06	1,02E-06	2,51E-05	1,00E-05	7,04E-07
Zn	kg	1,29E-06	7,19E-06	1,69E-05	8,25E-06	2,88E-04	4,19E-06	1,00E-05	7,77E-07
Cu	kg	3,08E-08	4,99E-06	3,46E-07	1,10E-06	2,91E-08	1,10E-06	1,72E-08	1,04E-08
As	kg	7,24E-10	2,91E-08	2,53E-08	1,67E-08	6,85E-10	1,00E-08	2,29E-07	1,89E-08
Hg	kg	9,41E-10	6,76E-09	6,11E-09	5,53E-09	8,91E-10	1,00E-09	7,84E-09	4,58E-09
<i>Emissões para a água</i>									
Sólidos suspensos	kg	--	6,33E-05	9,21E-05	3,99E-04	--	8,90E-04	1,48E-04	5,08E-05
Carência bioquímica de oxigênio (CBO5)	kg	--	8,48E-05	2,85E-04	2,00E-04	--	6,36E-04	1,25E-04	3,39E-05
Carência química de oxigênio (CQO)	kg	--	2,34E-04	6,28E-04	7,99E-04	--	8,90E-04	4,40E-04	5,08E-05
Cr	kg	--	2,11E-09	7,82E-06	2,50E-07	--	1,27E-05	n.d.	n.d.
Pb	kg	--	2,09E-08	1,68E-05	4,99E-07	--	2,54E-05	n.d.	n.d.
Ni	kg	--		1,23E-05	4,99E-07	--	2,54E-05	n.d.	n.d.
Cd	kg	--	6,34E-10	1,12E-05	4,99E-07	--	7,63E-06	n.d.	n.d.
Zn	kg	--		2,23E-05	5,69E-06	--	5,09E-05	n.d.	n.d.
P	kg	--	1,05E-08	n.d.	n.d.	--	n.d.	n.d.	n.d.
N	kg	--	6,33E-06	n.d.	n.d.	--	n.d.	n.d.	n.d.

Tabela 43 – Dados de inventário para a produção de 1 m<sup>2</sup> de revestimento (“saídas”) (continuação)

Saídas	Unidades	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
<i>Resíduos</i>									
Resíduos totais produzidos	kg	4,70E+00	2,90E+00	4,14E-01	1,70E+00	4,56E+00	3,68E+00	9,12E-01	7,29E-01
Resíduos valorizados	kg	4,67E+00	2,87E+00	4,13E-01	1,67E+00	4,53E+00	3,67E+00	8,71E-01	5,67E-01
Resíduos não valorizados	kg	3,41E-02	2,05E-02	9,05E-04	3,40E-02	3,34E-02	1,66E-03	4,58E-02	1,61E-01
Resíduos perigosos	kg	5,04E-02	4,31E-03	1,93E-03	1,63E-03	4,99E-02	3,14E-03	6,25E-04	1,22E-03

n.d. – não disponível (dado não medido ou não disponibilizado pela empresa); --não aplicável

Tabela 44 – Distribuição percentual do consumo de energia (gás natural) no processo na fábrica (A3) para revestimento

Etapa (%)	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
Atomização	36	30	38	--	--	--	--	
Secagem	20	22	18	18	22	25	20	24
Cozedura	44	48	44	82	78	75	80	76

--não aplicável

O consumo de matérias-primas está relacionado com a espessura dos diversos materiais, verificando-se que as perdas de material (originadas no processo, nomeadamente nas operações térmicas e escolha) podem atingir os 9 a 12%, o que é típico para este material.

Apenas as empresas que dispõem de secção de preparação de pastas (RC1, RC2 e VC3) conseguem efetuar a valorização de resíduos produzidos no próprio processo produtivo (poeiras de despoeiramento ou de outros sistemas de tratamento, caco crú e seco, não conformidades e ineficiências durante o processo produtivo antes da cozedura).

As quantidades de vidro e corantes são função das decorações que cada empresa efetua por questões de design e estética. Verificou-se que nem sempre a classificação como vidros e corantes é uniforme dentro das amostras (das empresas) deste subsector. Esta quantidade é ainda superior no revestimento quando comparada com o pavimento.

As empresas em ciclo completo apresentam maiores consumos energéticos quer em termos de eletricidade quer de combustível principal (gás natural), tal como seria de esperar, uma vez que possuem uma secção adicional de preparação de pasta com mais um equipamento de secagem de barbotina (atomizador) e vários tanques de agitação e homogeneização. Adicionalmente o consumo específico é maior para RC2 como seria de esperar, uma vez que possui um maior número de tratamentos subsequentes do material (operações de polimento e amaciamento) que consomem energia elétrica adicional.

Nas empresas com ciclo parcial verifica-se que os revestimentos com maiores espessuras apresentam tendencialmente maiores consumos específicos de gás natural, tal como seria expectável. RP8 apresenta o menor consumo específico, apresentando também menores formatos e menores espessuras, tratando-se também da produção num forno mais recente e inovador do subsector (e consequentemente mais otimizado em termos de consumos e eficiência). Já RP4 e RP5 são fabricadas em unidades fabris mais antigas e que sofreram reconversão de ciclo completo para o ciclo parcial, logo menos eficientes.

O gasóleo, utilizado em movimentações e transportes internos, atinge os máximos para RP4 (empresa que dispõe de um armazém em edifício independente à unidade fabril, logo as distâncias são superiores às das restantes empresas), seguindo-se as empresas em ciclo completo de pasta branca (RC1 e RC2) uma vez que para além de transportes de produto, tem ainda os transportes e movimentações de matérias-primas (nomeadamente através de uma pá carregadora). Já o RP8, com o menor consumo específico é fabricado numa instalação recente dotada de empilhadores maioritariamente elétricos.

O GPL é utilizado para efetuar a retractibilização manual de meias paletes (ou paletes especiais), visto que a retractibilização automática é efetuada com recurso a gás natural nas empresas deste subsector. Neste contexto, o seu valor é baixo e função de necessidades sentidas e determinadas pelo mercado (particularmente nos anos de crise em que a opção por meias cargas é mais intensa).

As empresas em ciclo completo, por terem a possibilidade de reutilizar águas residuais tratadas na ETARI para a preparação de pastas ou em lavagens nesta secção e lavagens de piso fabril, apresentam consumos de água extraída mais baixos, nomeadamente a RC1 e RC2. Sendo de mencionar que RC2 recicla 100% das águas residuais tratadas na ETARI.

Já o valor do consumo específico da embalagem de cartão reflete para além de requisitos de segurança também opções de marketing, existindo material de cartão que cobre totalmente o revestimento (RC1, RC2, RP5) e outras em que se utilizam apenas faixas de cartão deixando algum material cerâmico visível (RP4, RP6, RP8); podem ainda existir sistemas híbridos com as duas soluções anteriores. A espessura do material cerâmico condiciona também a embalagem, com a tendência para as maiores espessuras exigirem mais cartão, pois levam menos peças por caixa (tipicamente dimensionada para 1 m<sup>2</sup>).

Quanto às paletes de madeira a tendência é a mesma da verificada para o cartão, com as maiores espessuras e formatos a corresponder a maiores necessidades desta embalagem, apesar de depender muita das opções de retoma das paletes de madeira para reutilização ou não. Assim RC1, RC2 e RP5 são fabricadas em empresas com consumos específicos mais elevados e influenciados por serem muito exportadoras e com menores possibilidades de reutilização de paletes, logo tem de adquirir mais paletes “novas”, enquanto RP7 para além de exportar possui um consumo elevado pois efetua muitas meias-cargas de paletes para “nichos” de mercado.

Em termos de emissões para a atmosfera, as emissões de CO<sub>2</sub> parecem exhibir o padrão expectável, uma vez que as amostras em ciclo completo apresentam valores mais elevados do que as amostras em ciclo parcial, e dentro deste último conjunto a variação parece acompanhar a densidade (espessura e/ou formato maiores) do material. Já para os restantes poluentes verificam-se comportamentos sem um padrão muito definido, onde as empresas dotadas de sistema de tratamento de filtro de cascata com brita calcária (RC1, RP4, RP5 e RP6) apresentam tendencialmente valores inferiores de HF, HCl, SO<sub>x</sub> e metais. Ressalva-se que RP8 (tecnologia mais moderna embora sem filtro cascata mas com a menor densidade de material) é uma exceção a este comportamento.

A produção de resíduos nas 8 referências de revestimento é bastante distinta, verifica-se que os maiores valores são atingidos para RC1 e RP5, enquanto os menores valores para VC3, RP7 e RP8, com uma tendência para acompanhar a densidade dos materiais, tal como seria de expectável, uma que os cacos cozidos são o resíduo produzido em maior quantidade, e a quebra de uma peça de grande formato e/ou espessura origina mais resíduos. A qualidade da produção influencia também este indicador. RP5 e RP6 acabam por apresentar valores um pouco acima do expectável, mas o forno que cada uma utiliza possuiu já alguma idade. Os resíduos gerados são preferencialmente valorizados com taxas superiores a 95%, exceto a RP8 (taxa de 78%).

#### **4.4.1.5 Avaliação de impactos ambientais**

As categorias de impacto e indicadores para efetuar a AICV devem basear-se na tipologia de impactos expectáveis face à natureza do material, dos dados de entrada e de saída, e consequente relevância, na sua viabilidade de quantificação, sua robustez e sua aplicabilidade. Os critérios utilizados no revestimento foram os mesmos do pavimento cerâmico e que se encontram explicitados no item 4.3.2.5.

Assim, e tal como para o pavimento, foram selecionadas as seguintes categorias e métodos:

- aquecimento global, depleção da camada de ozono, depleção de recursos abióticos (elementos), depleção de recursos abióticos (fósseis), eutrofização, acidificação, formação de ozono fotoquímico (oxidação fotoquímica), de acordo com a norma EN 15804+A1:2013 (CEN, 2013) e usando a versão do CML-IA (Leiden University, 2012);
- matéria particulada, uso do solo, toxicidade humana e ecotoxicidade para a água doce, depleção da água, usando os fatores de caracterização previstos nos métodos recomendados pelo ILCD (EC-JRC, 2012), conforme recomendação da UE que aborda a PAP.

Adicionalmente a acidificação e oxidação fotoquímica pelos métodos recomendados pelo ILCD (EC-JRC, 2012), de forma a poder averiguar se o comportamento é semelhante ao previsto pelo CML-IA.

Na Tabela 12 do item 4.1.2.5 consta para cada categoria de impacto, a unidade, os métodos e referências bibliográficas usadas.

#### **4.4.2 Resultados e discussão**

As tabelas A.17 e A.18, em anexo, apresentam o potencial impacto ambiental para o revestimento cerâmico em estudo, usando a ACV e os métodos de avaliação de impactos referidos anteriormente (CML-IA, ILCD) para a unidade funcional (1 m<sup>2</sup>) e para a unidade declarada (1 kg) na abordagem do berço ao túmulo, enquanto as tabelas A.19 e A.20 apresentam a mesma tipologia de informação mas para a abordagem do berço ao portão (A1 a A3). Nestes resultados foram excluídas das fronteiras do sistema, a produção e manutenção de bens de capital, tais como edifícios, maquinaria, equipamentos, etc.

##### **4.4.2.1 Abordagem do berço ao túmulo**

Da Figura 107 à Figura 121 representa-se a contribuição relativa de cada etapa do ciclo de vida, para o impacto ambiental total para todas as categorias de impacto ambiental em estudo, com base na abordagem modular da EN 15804 desde a etapa A1-A3 (extração, transporte e fabrico), módulo de transporte de produto (A4), módulo de construção e

instalação (A5), etapa de utilização (B) até à etapa C (fim de vida), ou seja do berço ao túmulo.

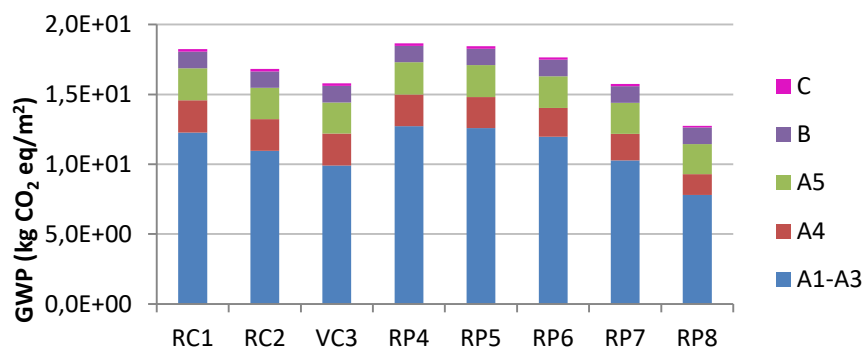


Figura 107 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para o aquecimento global (GWP) por m² de revestimento

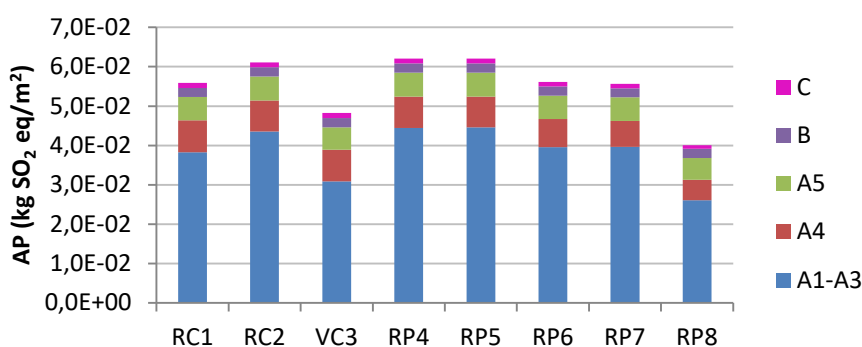


Figura 108 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a acidificação (AP) por m² de revestimento

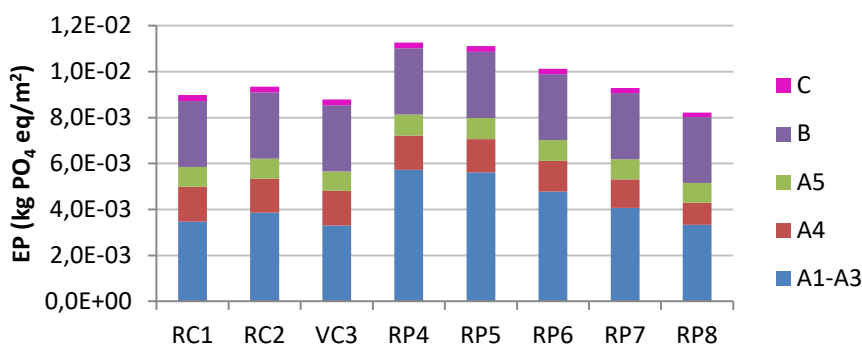


Figura 109 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a eutrofização (EP) por m² de revestimento

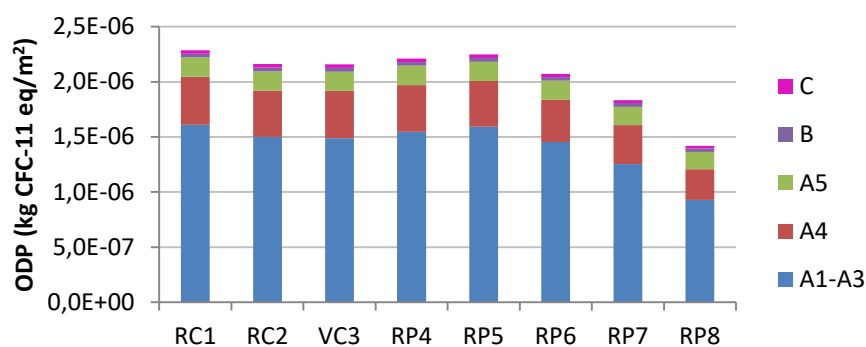


Figura 110 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a depleção da camada de ozono (ODP) por  $m^2$  de revestimento

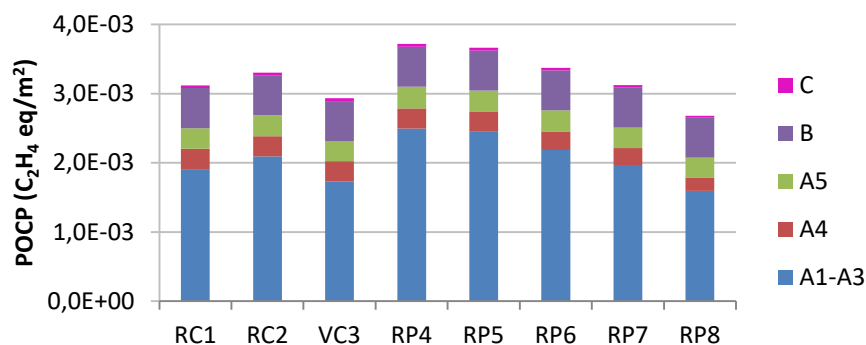


Figura 111 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a Oxidação fotoquímica (POCP) por  $m^2$  de revestimento

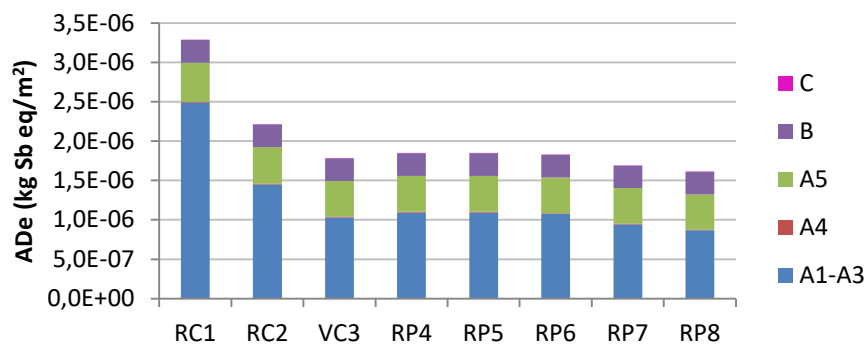


Figura 112 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por  $m^2$  de revestimento



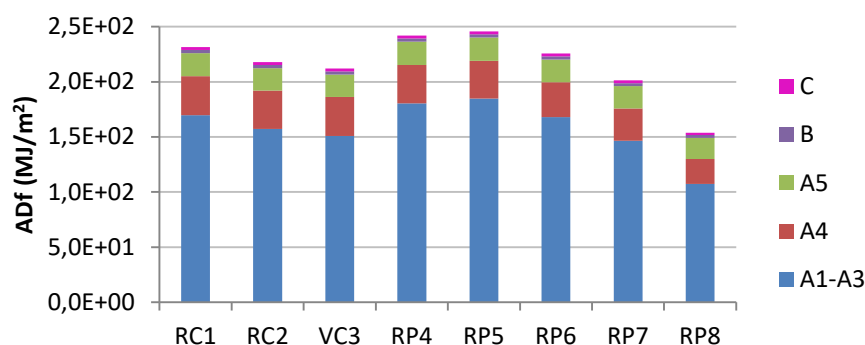


Figura 113 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a Depleção de recursos – fósseis (ADf) por  $m^2$  de revestimento

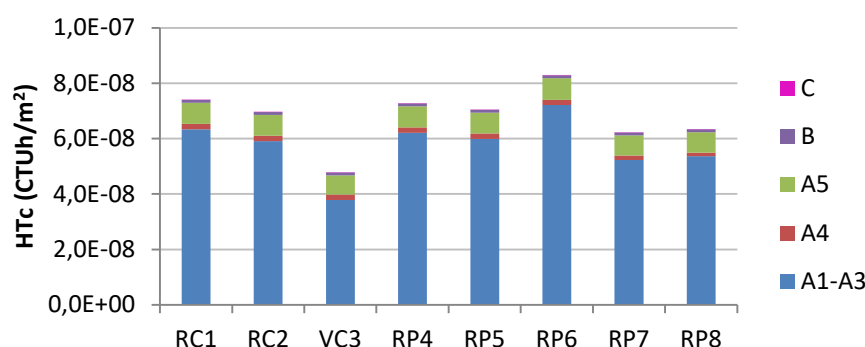


Figura 114 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – cancerígeno (HTc) por  $m^2$  de revestimento

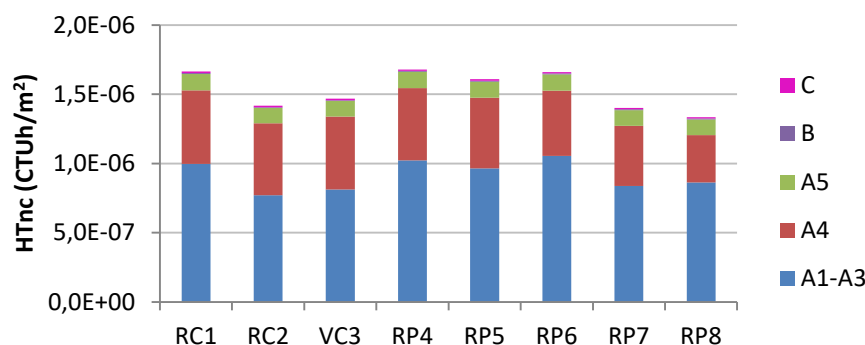


Figura 115 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por  $m^2$  de revestimento

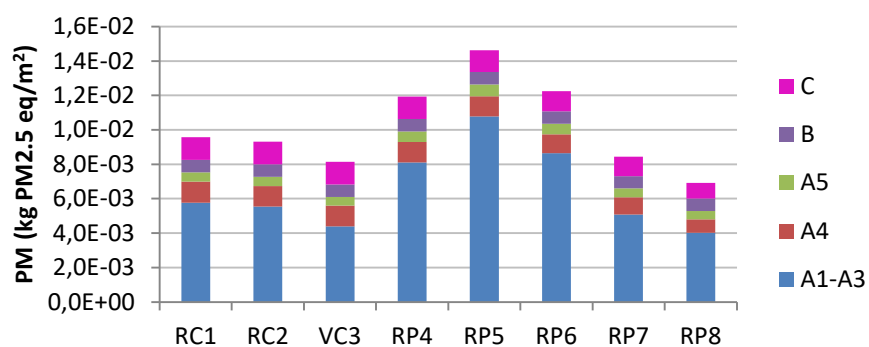


Figura 116 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para partículas (PM2.5) por m² de revestimento

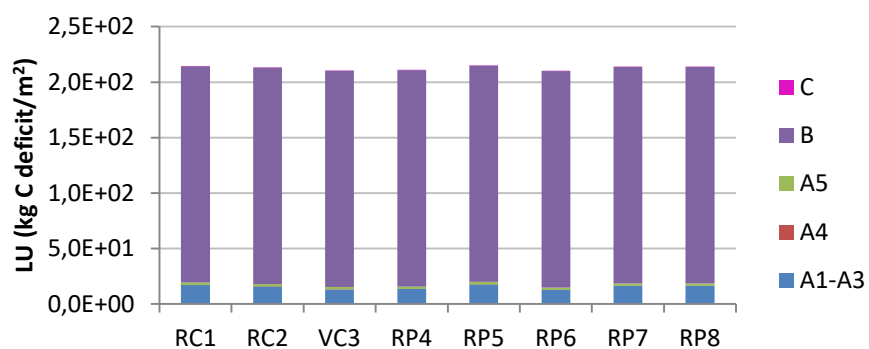


Figura 117 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para uso do solo (LU) por m² de revestimento

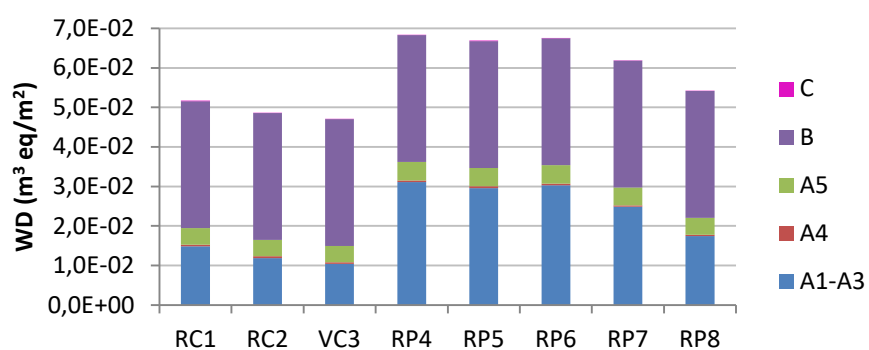


Figura 118 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para depleção da água (WD) por m² de revestimento

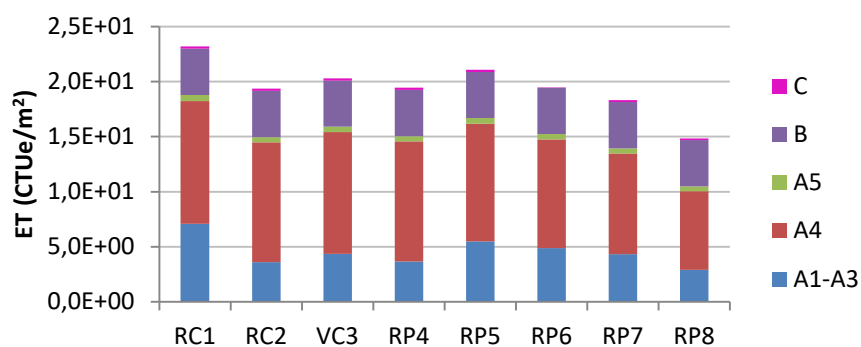


Figura 119 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para ecotoxicidade (ET) por m² de revestimento

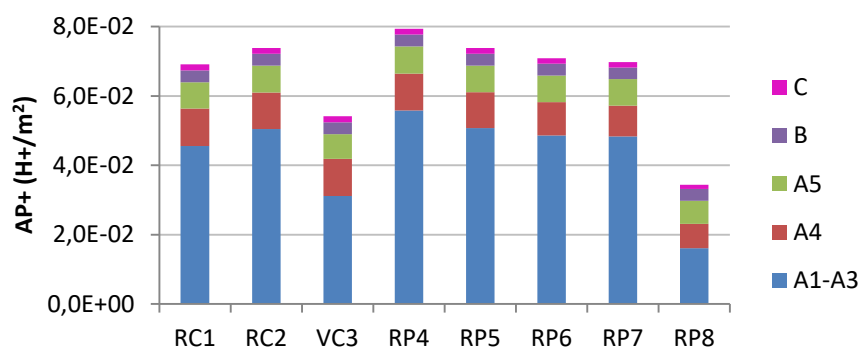


Figura 120 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para acidificação pelo método estipulado pelo ILCD (AP+) por m² de revestimento

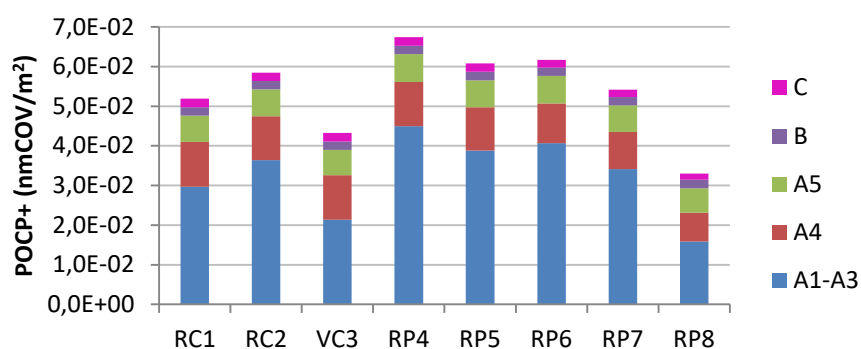


Figura 121 – Contribuição de cada etapa do ciclo de vida para oxidação fotoquímica pelo método estipulado pelo ILCD (POCP+) por m² de revestimento

### **i. Análise geral**

De um modo genérico verifica-se que os menores impactes verificados por unidade funcional ( $m^2$ ) ocorrem para as menores densidades de material (associados a menores espessuras e/ou formatos) nomeadamente RP8, RP7, e ainda para o revestimento vermelho (VC3) em algumas categorias. Para a depleção da água, o comportamento é distinto pois as empresas em ciclo completo apresentam melhor desempenho, face à maior possibilidade de recirculação de água residual no processo.

Quanto aos maiores impactes estes registam-se geralmente para os ladrilhos de revestimento com maior peso específico, que exigem maiores consumos de energia e consequentes emissões, exceto o de pasta vermelha (VC3) que pela natureza das suas matérias-primas e do produto final exige menores temperaturas. Em regra, RP4 e RP5 apresentam os piores desempenhos sendo que são produzidos em duas unidades industriais que foram reconvertidas de ciclo completo para ciclo parcial (podendo existir secções não totalmente eficientes ou otimizadas em termos de consumos, por exemplo elétricos). No caso de RP5 existe uma aposta no tratamento subsequente do material (operações de retificação, polimento e amaciamento) pelo que os consumos de energia elétrica são superiores, já os de água não se refletem tanto pois a recirculação de água nesta seção de retificação é total.

Em termos do ciclo completo, verifica-se que o revestimento vermelho (VC3), com o uso de matérias-primas locais, argila vermelha e sendo um produto com menores necessidades térmicas, possui o melhor desempenho em quase todas as categorias de impacto, exceto toxicidade humana não cancerígena e ecotoxicidade, onde RC2 apresenta um desempenho ligeiramente mais baixo, provavelmente associado a menores quantidades de vidro aplicado que contêm alguns metais pesados (como o zinco, chumbo, cádmio, antimónio, etc.) e que contribuem para estas categorias impacto.

Quando se compara o revestimento por prensagem em ciclo completo com o revestimento em ciclo parcial os valores também não são substancialmente diferentes. Porém para a maioria das categorias verifica-se que o ciclo completo apresenta melhor desempenho. Nas amostras em ciclo parcial, as diferenças encontradas nos impactes, para além das relacionadas com o peso específico, poderão estar associadas ao modo de condução e operação dos fornos, às diferentes matérias-primas e auxiliares em uso e seu modo de composição (ex. quantidades) e às tipologias/composições de vidros.

Verifica-se que os valores obtidos em cada categoria de impacto se encontram quase sempre na mesma ordem de magnitude, embora a comparação por unidade funcional ( $m^2$ ) e por unidade declarada (kg) possa assumir diferentes comportamentos consoante a categoria de impacto (ver detalhe nas tabelas A.17 e A.18 em anexo):

- a dispersão de valores por unidade declarada (kg) é menor (varia de 7% a 37%) do que a verificada por unidade funcional ( $m^2$ ) (varia de 28% a 57%) para as categorias aquecimento global, acidificação, depleção da camada de ozono, depleção de recursos fósseis, e ecotoxicidade. Verificando-se que estas categorias estão mais influenciadas por processos consumidores de energia (ex. cozedura, atomização, secagem) que por sua vez são condicionados pela massa e espessura do revestimento;
- já para a eutrofização, depleção abiótica de elementos e toxicidade humana (cancerígena e não cancerígena), uso do solo e depleção da água se verifica uma menor dispersão por unidade funcional ( $m^2$ ) (varia de 2% a 42%), face à unidade declarada (kg) (varia de 30% a 51%). A justificação deverá estar associada à influência das operações aplicadas por área de superfície de revestimento ( $m^2$ ) a nível fabril, como seja a aplicação de vidros e o tratamento subsequente como polimento, amaciamento, que consomem energia e água;
- a oxidação fotoquímica e as partículas (PM<sub>2.5</sub>) apresentam variações semelhantes (entre o pior e o melhor desempenho) por unidade declarada e por unidade funcional.

Esta variação de comportamento entre unidade funcional e declarada, associada à natureza das categorias (semelhante à obtida para o pavimento), é no entanto menor do que a obtida para as amostras do pavimento. Talvez porque nos pavimentos estudados existe uma maior diversidade de matérias-primas e de produtos finais nos estudos de caso, para além dos pressupostos metodológicos apontados.

### ii. Contributo de cada etapa do ciclo de vida

Os maiores impactes ao longo do ciclo de vida registam-se para a etapa do berço ao portão (módulos de A1 a A3) que representa de 42% a 87% do impacte global, ou seja é a etapa mais significativa para todas as categorias de impacte exceto uso do solo, depleção da água e ecotoxicidade, onde a etapa de uso (etapa B) assume um papel preponderante nas duas primeiras categorias e o transporte/distribuição (A4) para a ecotoxicidade. Este comportamento é semelhante ao exibido para o pavimento, exceto para a eutrofização onde a etapa de uso (B) era mais relevante do que a etapa A1-A3, provavelmente associado ao maior número de lavagens que o pavimento necessita face ao revestimento.

O transporte/distribuição do produto (A4), baseada num cenário de transporte por camião de 25 toneladas com um percurso de 1000 km de distância, é o módulo mais relevante para a ecotoxicidade como acima referido. Representa a segunda mais relevante (26% a 37%) para acidificação, depleção da camada de ozono, depleção de recursos fósseis, oxidação fotoquímica (ILCD), toxicidade humana não cancerígena e ainda o aquecimento global (este

com 12% a 22%). Já para a eutrofização, oxidação fotoquímica (CML-IA) e partículas (PM<sub>2.5</sub>), representa a terceira mais relevante (7 a 19%).

Já o módulo de construção (A5), influenciado pela contribuição do cimento-cola (fixativo) e a água, exibe o segundo lugar (com 10% a 28%) para a depleção de recursos elementos e para a toxicidade humana cancerígena; e o terceiro ou quarto lugar para a maioria das restantes categorias. Já a etapa de uso (B), com a utilização de detergente e água para as operações de lavagem do revestimento e o próprio uso do edifício, é a mais relevante para o uso do solo (91% a 93%) e para a depleção da água (47% a 68%), conforme já referido. Sendo ainda relevante para a eutrofização de 26% a 35% (segundo contribuinte), e para a depleção de recursos elementos e oxidação fotoquímica (CML-IA) de 9% a 22%. Para as restantes categorias de impacto a sua representatividade é pouco significativa (inferior a 10%) ou mesmo insignificante.

Finalmente a etapa de fim de vida (C) é a segunda mais relevante para a categoria de impacto das partículas (PM<sub>2.5</sub>) (9% a 17%) relacionada com o tipo de atividades desenvolvidas nos processos de demolição e desconstrução, e consequentes impactos na qualidade do ar, apesar de ser residual para todas as restantes categorias de impacto com contributos inferiores a 5%.

De mencionar que para a oxidação fotoquímica verifica-se um contributo distinto para as etapas, tal como no pavimento, com a etapa do berço ao portão (A1-A3) a assumir o papel mais relevante com ambos os métodos (entre 48% e 67%), mas no caso do método CML-IA a segunda etapa contribuinte é a de uso (B) enquanto pelo método ILCD é a etapa de transporte (cenário de 1000 km), face principalmente aos métodos utilizarem fatores de caracterização e algumas substâncias distintas conforme já mencionado.

Por fim, estes contributos para as diferentes etapas do ciclo de vida estão muito alinhados com os mencionados para o pavimento, tal como seria de esperar face à tipologia de matérias-primas, processo de fabrico e condições de cozedura.

#### **4.4.2.2 Abordagem do berço ao portão**

Uma vez que a etapa do berço ao portão (A1-A3) é a mais significativa será detalhada em termos de análise dos diferentes contributos dos processos que a compõem.

Da Figura 122 até à Figura 136 é evidenciado o contributo de cada processo unitário para a etapa do berço ao portão (etapas A1 a A3) nomeadamente para a:

- produção de matérias-primas e auxiliares (argila, caulino, carbonato de cálcio, quartzo e feldspato, materiais para decoração incluindo vidragem, lubrificante, materiais auxiliares para manutenção e pó atomizado), designada na legenda por “Prod. MP e aux”;

- produção de materiais de embalagem (cartão, plástico e paletes de madeira), designada por “Prod. embalagem”;
- produção de combustíveis (gás natural, GPL e gasóleo), designada por “Prod. combustíveis”;
- produção de eletricidade, designada por “Prod. eletricidade”;
- tratamentos de águas, água residual e resíduos, designada por “Tratamento emissões”;
- atividades decorrentes na fábrica (consumos e emissões decorrentes do processo de fabrico cerâmico, com destaque para a preparação de pasta atomizada, secagem e cozedura) designada na legenda por “Atividades na fábrica”; e
- as atividades de transporte (transporte de matérias-primas e auxiliares dos locais de extração e/ou processamento para a fábrica), designada por “Transporte”.

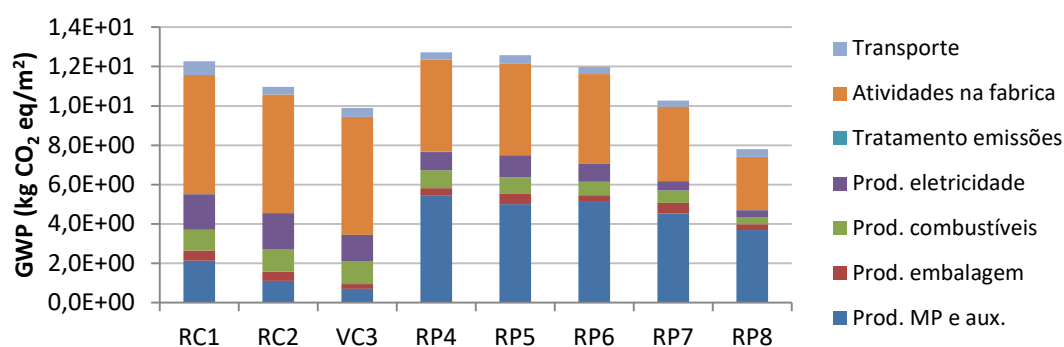


Figura 122 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para o aquecimento global (GWP) por m² de revestimento

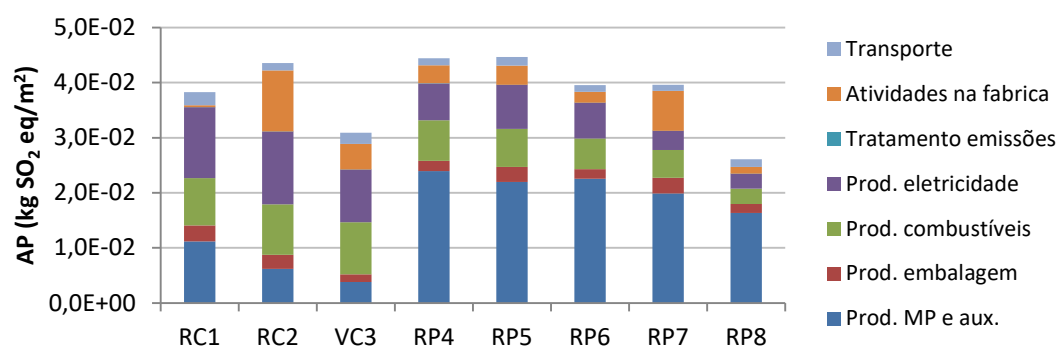


Figura 123 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a acidificação (AP) por m² de revestimento

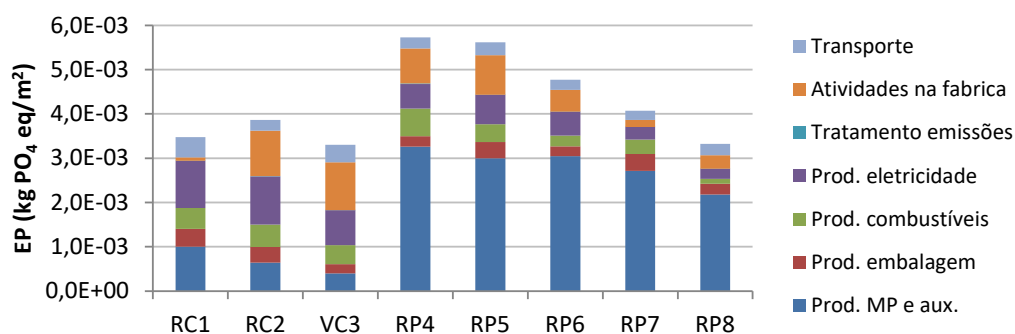


Figura 124 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a eutrofização (EP) por m² de revestimento

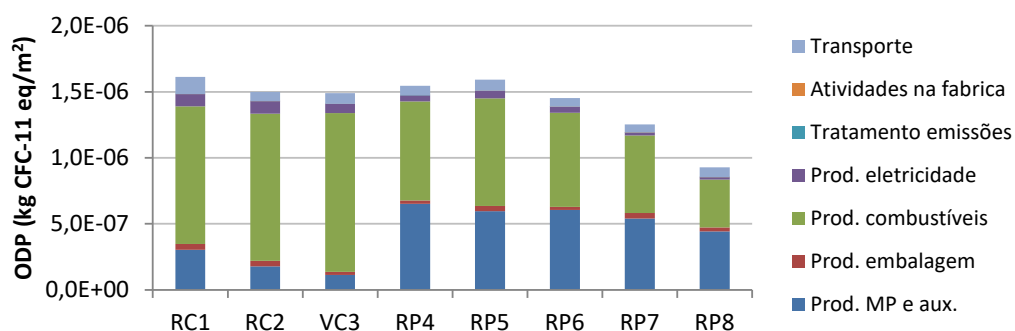


Figura 125 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a camada de ozono (ODP) por m² de revestimento

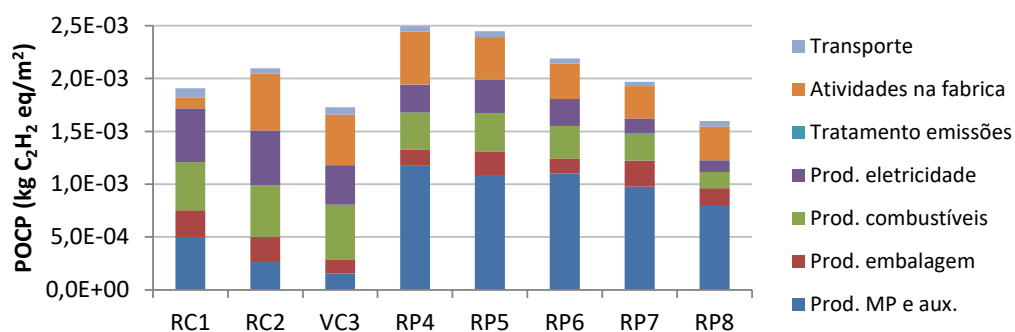


Figura 126 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a oxidação fotoquímica (POCP) por m² de revestimento



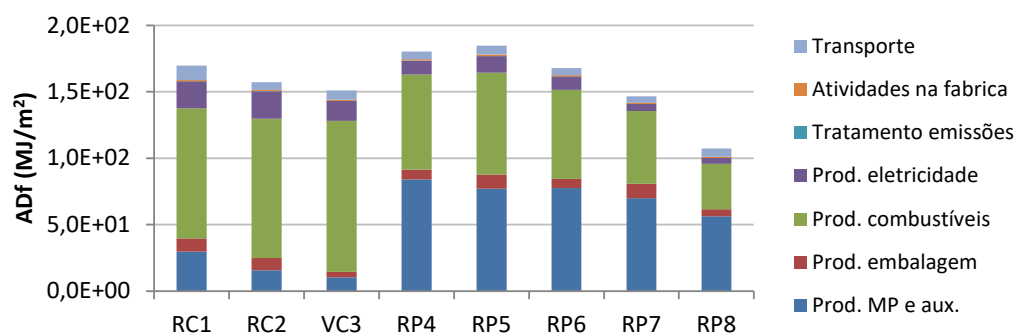


Figura 127 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a depleção de recursos – fósseis (ADf) por  $m^2$  de revestimento

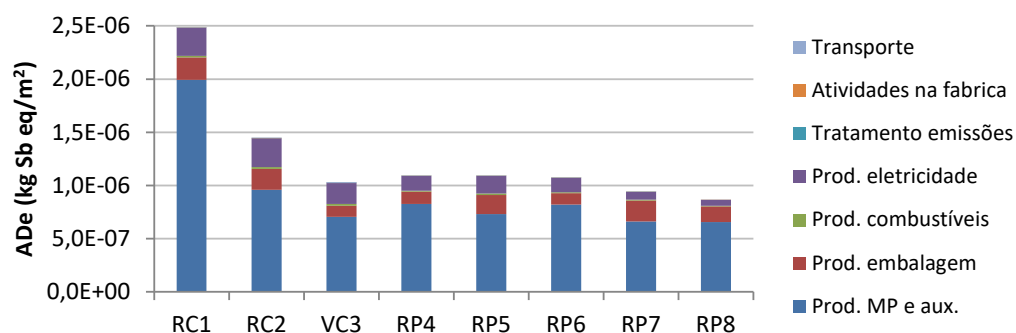


Figura 128 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe) por  $m^2$  de revestimento

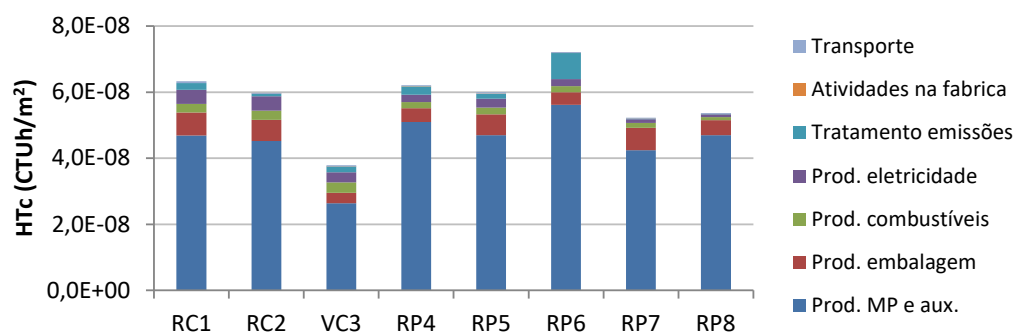


Figura 129 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – cancerígeno (HTc) por  $m^2$  de revestimento

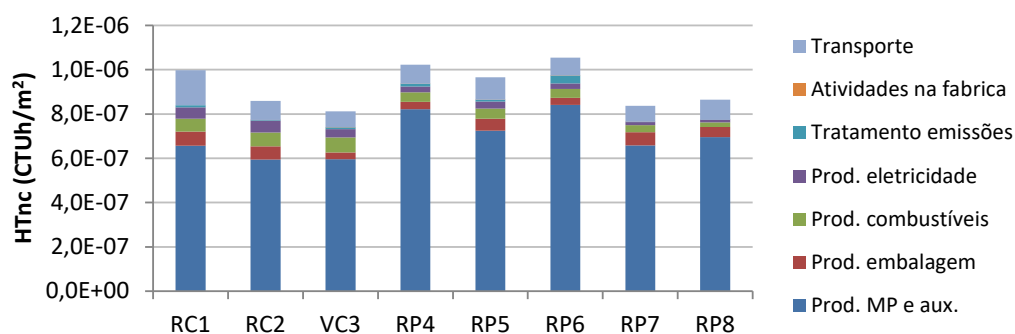


Figura 130 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para a toxicidade humana – não cancerígeno (HTnc) por m² de revestimento

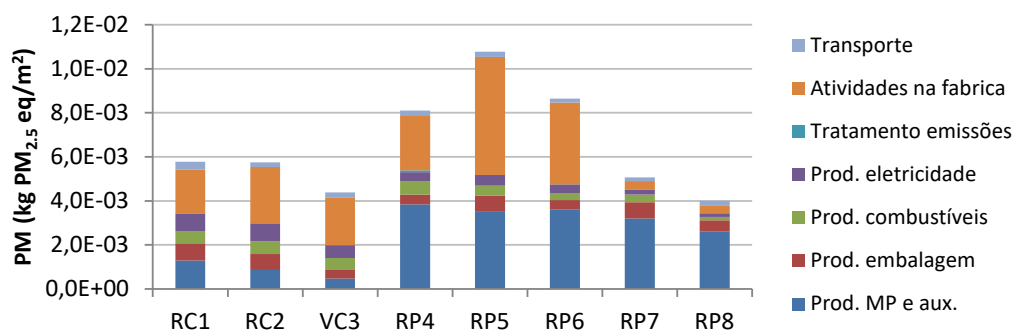


Figura 131 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para partículas (PM2.5) por m² de revestimento

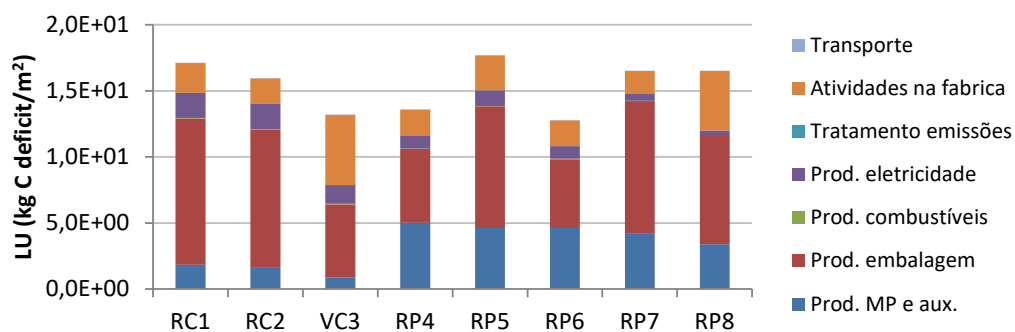


Figura 132 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para uso do solo (LU) por m² de revestimento

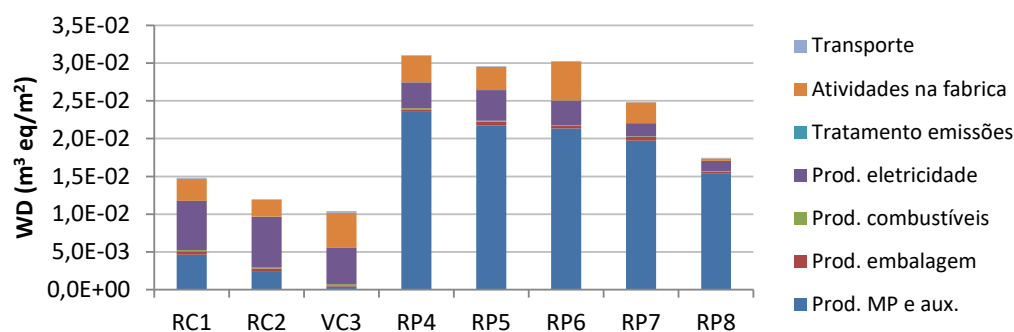


Figura 133 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para depleção da água (WD) por m² de revestimento

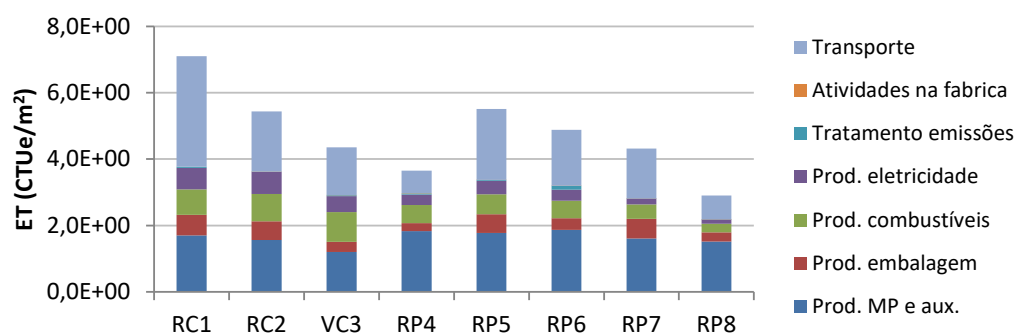


Figura 134 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para ecotoxicidade (ET) por m² de revestimento

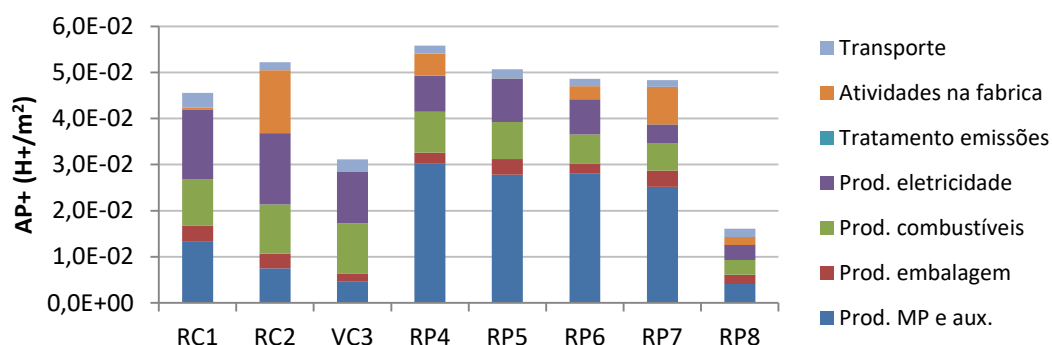


Figura 135 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para acidificação pelo método estipulado pelo ILCD (AP+) por m² de revestimento

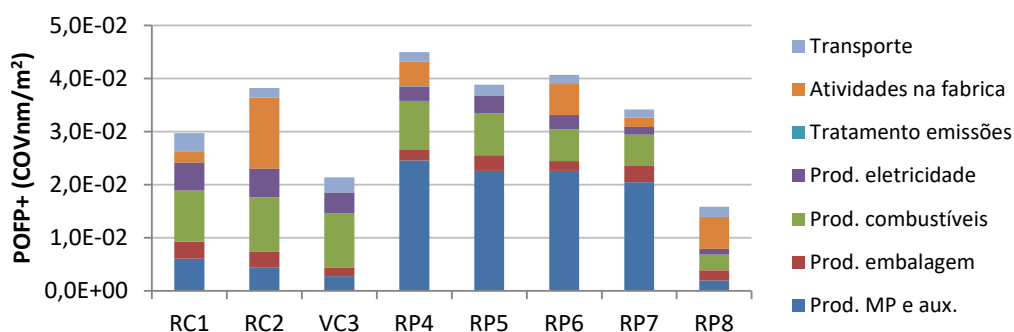


Figura 136 – Contribuição de cada processo (da etapa A1-A3) para Oxidação fotoquímica pelo método estipulado pelo ILCD (POCP+) por m² de revestimento

### i. Comportamento por categoria de impacto

O comportamento dos vários ladrilhos de revestimento é semelhante ao já descrito no capítulo anterior para o pavimento. Assim, para o aquecimento global, acidificação (CML-IA e ILCD), eutrofização, depleção da camada de ozono, oxidação fotoquímica (CML-IA e ILCD), depleção de recursos fósseis e partículas (PM2.5), verifica-se que os menores impactos são alcançados para os ladrilhos menores pesos específicos (RP7 e RP8) e/ou ainda para a pasta vermelha (VC3) face à influência dos processos energéticos (elétrico e térmico) e as consequentes emissões nestas categorias.

Para o aquecimento global constata-se que as “atividades na fábrica” são o processo dominante (49% a 61%) para o ciclo completo, associado à emissão de CO<sub>2</sub> nas operações da cozedura, atomização e secagem. Já no revestimento em ciclo parcial o destaque é ligeiramente superior para a “produção de matérias-primas e auxiliares” (40% a 47%) que inclui ainda as atividades do fornecedor de pasta (ex. preparação de pasta, atomização e transporte), ainda que com um peso semelhante às “atividades na fábrica” (35% a 38%).

No caso da acidificação, eutrofização e oxidação fotoquímica (CML-IA) verifica-se que, para o revestimento em ciclo completo, estas são influenciadas maioritariamente pela “produção da eletricidade” (20% a 35%), seguido da “produção de matérias-primas e auxiliares” ou “atividades na fábrica”. Já no revestimento em ciclo parcial se verifica que a “produção de matérias-primas e auxiliares” (44% a 67%) é a dominante refletindo os equipamentos de moagem, peneiração e outros movidos a eletricidade no fornecedor e ainda o consumo de gás natural no atomizador (consumos estes refletidos nas atividades na fábrica nos ladrilhos de ciclo completo). Já na oxidação fotoquímica pelo ILCD se verifica que os principais responsáveis são a “produção de combustíveis” (27% a 48%) nos ladrilhos em ciclo completo.

Os contributos para estas 3 categorias de impacto estão assim associados às atividades de combustão quer na produção da eletricidade, quer na extração e processamento de

recursos naturais, quer nas atividades fabris, que emitem SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, COV, CO, HF, HCl, metais. Destacando-se que a emissão de SO<sub>x</sub> é responsável por mais de 65% da acidificação e mais de 50% da oxidação fotoquímica, enquanto para a eutrofização os NO<sub>x</sub> representam mais de 75%, seguindo-se o CO e fosfatos. Neste âmbito importa referir que as empresas com sistemas de tratamento com filtro de adsorção possuem tendencialmente menores emissões de HF, HCl, SO<sub>x</sub> e metais, por muito que este comportamento não seja muito uniforme.

No caso das partículas (PM<sub>2.5</sub>), para o revestimento sujeito a ciclo completo, constata-se que as “atividades na fábrica” são as mais relevantes (25% a 50%) seguindo-se a “produção de matérias-primas e auxiliares”, enquanto no revestimento sujeito a ciclo parcial se verifica a primazia da “produção de matérias-primas e auxiliares” (47% a 65%) ou as “atividades na fábrica” (43% a 50%). Este comportamento mais distinto no ciclo parcial parece estar associado à existência de sistema de tratamento de fluoretos que, apesar de minimizar HF, HCl, SO<sub>2</sub>, neste caso incrementa as partículas (efeito cruzado, reportado no BREF da cerâmica (European Commission, 2007) para esta MTD), verificando-se mesmo que a emissão é maior em RP4, RP5 e RP6 que possuem este sistema de tratamento. Tal como no pavimento, as maiores emissões estão associadas ao ciclo completo devido ao processo de atomização, que ocorre apenas nestas, e produz emissões de partículas para a atmosfera (apesar de todas as empresas possuírem ciclone seguido de lavador de gases) e ainda a sistemas de despoeiramento associados à secção de preparação de pasta e conformação e respetiva eficiência.

Já na categoria da depleção da camada de ozono, a “produção de combustíveis” é o principal responsável (47% a 81%, exceto RP8 que representa o segundo lugar com 39%) do impacto, associado ao uso de gases de refrigeração com substâncias depletoras da camada de ozono (principais Hallon 1211 e Hallon 1301). Também para a depleção de recursos fósseis, a “produção de combustíveis” assume o processo mais relevante no ciclo completo, representando 58% a 75% para os ladrilhos, sendo como expectável o melhor desempenho alcançado para o revestimento em pasta vermelha (VC3). Já no revestimento em ciclo parcial, a “produção de matérias-primas e auxiliares” representa de 41% a 48%, enquanto a “produção de combustíveis” significa 32% a 42%. De mencionar que o comportamento nestas duas categorias segue o padrão associado ao consumo do gás natural ou seja os mínimos são atingidos no revestimento com o peso específico mais baixo (RP8, RP7) e os máximos para RP5, RP4 e RC1, com maiores necessidades térmicas conforme já explanado.

No que respeita à depleção de recursos abióticos (elementos), a “produção de matérias-primas e auxiliares” é o maior contribuinte (67% a 80%), tal como seria de esperar face à natureza destas atividades. O comportamento não difere de ciclo parcial para o ciclo completo, sendo de destacar o contributo do caulino na RC1.

Também para a toxicidade humana (HTc e HTnc) a “produção de matérias-primas e auxiliares” é a mais significativa (66% a 87%) associada a metais pesados (zinco, crômio, mercúrio entre outros) que quer as matérias-primas quer os vidros contêm ou utilizam no seu processamento. Verifica-se o mínimo valor para a pasta vermelha (VC3), face à tipologia de matérias-primas para o corpo cerâmico e para o vidro utilizado na decoração.

No caso da ecotoxicidade verifica-se que o “transporte” é o principal contribuinte (33% a 47%) para os revestimentos em ciclo completo seguido da “produção de matérias-primas e auxiliares”, enquanto para o revestimento em ciclo parcial se verifica o reverso com a “produção de matérias-primas e auxiliares” a ser a maioritária (37% a 52%) seguida do “transporte” (18% a 35%). Este comportamento é explicado por o “pó atomizado” (ciclo parcial) percorrer baixas distâncias (loteamentos de argilas nacionais e em menor escala estrangeiras) quando comparadas a algumas matérias-primas da pasta adquiridas no exterior (Espanha, Turquia, Inglaterra) pelo revestimento em ciclo completo (RC1, RC2). O revestimento vermelho (VC3) recorre essencialmente a matérias-primas nacionais.

A “produção de embalagem” é o processo dominante para o uso do solo (41% a 65%) devido ao contributo das paletes de madeira, com os maiores valores absolutos obtidos para RC1, RC2, RP5 e RP7 que utilizam uma maior quantidade de paletes de madeira por m<sup>2</sup> (uma vez que as três primeiras são muito exportadoras logo com menor retoma e a última vende muitas encomendas pequenas compostas por meias cargas).

Finalmente, para a depleção da água, o comportamento é distinto entre os revestimentos em ciclo completo e em ciclo parcial verificando-se que estes últimos possuem valores superiores, associados à “produção de matérias-primas e auxiliares” que é o processo dominante (71% a 88%), reflexo das operações de consumo de água e lavagens que ocorrem na unidade industrial que produz o pó atomizado, e cuja recirculação deverá ser reduzida. Já nas fábricas em ciclo completo, a “produção de eletricidade” representa o maior contributo (44% a 56%) para esta categoria.

Face a este contexto, e da análise da Figura 122 até à Figura 136 pode-se inferir que:

- a “produção de matérias-primas e auxiliares” é o contribuinte maioritário para a depleção de recursos elementos (67% a 80%) e para a toxicidade cancerígena (66% a 87%). É ainda o processo mais significativo mas apenas para os ladrilhos em ciclo parcial para as categorias de aquecimento global, acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica, depleção de recursos fósseis, depleção da água e ecotoxicidade e partículas (PM2.5) (apenas RP7 e RP8);
- a “produção de embalagem” é dominante para o uso do solo (41% a 65%);
- a “produção de combustíveis” é a mais significativa para a depleção da camada de ozono (explicado pelos arrefecimentos necessários na linha de gás natural) (47% a 81%), e ainda para a depleção de recursos fósseis (58% a 75% apenas para o ciclo

completo, assumindo a segunda posição no parcial). Já para a acidificação e oxidação fotoquímica apresenta um contributo moderado (10% a 48%);

- a “produção da eletricidade” é dominante para os revestimentos em ciclo completo nas categorias de acidificação, oxidação fotoquímica (CML-IA), depleção de água e eutrofização (RC1 e RC2), associado à secção de preparação de pasta que possui uma série de equipamentos alimentados a eletricidade (ex. moinhos, motores, etc.), filtros de despoeiramento na conformação e às operações subsequentes (polimento, amaciamento, etc.) a que o revestimento é sujeito;
- o “tratamento de águas, águas residuais, resíduos” é irrelevante para todas as categorias de impacte (contributo inferior a 1%);
- as “atividades na fábrica” são as mais relevantes para o aquecimento global (49% a 61%) e partículas (35% a 50%) nas fábricas em ciclo completo, enquanto nas de ciclo parcial arrogam a segunda posição imediatamente após a “produção de matérias-primas e auxiliares” (inclui a atomização). Possuem ainda algum significado para a acidificação, eutrofização e a oxidação fotoquímica (CML-IA);
- o “transporte” é o processo dominante para a ecotoxicidade (33% a 47%) no revestimento em ciclo completo, representando no parcial a segunda posição (associado às menores distâncias percorridas pelas matérias-primas para pasta).

### ii. Contributo da infraestrutura

O contributo das infraestruturas (produção e manutenção de bens de capital, etc.), nos resultados da abordagem do berço ao portão (A1-A3), encontra-se presente na Tabela 45. Este cálculo foi efetuado com base nos dados do Ecoinvent 3 (Ecoinvent, 2014), tal como mencionado noutros estudos de caso.

Da análise da Tabela 45 verifica-se que o comportamento, por categoria de impacte, é muito semelhante em todos os revestimentos em estudo (e muito afim à determinada para os pavimentos como mostra a Tabela 35).

Tal como no pavimento, também para o revestimento se verifica que a depleção de recursos abióticos elementos é a categoria de impacte cuja influência das infraestruturas (instalação fabril e maquinarias) é mais acentuada variando de 68% a 90%, seguindo-se o uso do solo com 40% a 54%, depois a toxicidade humana - efeito cancerígeno, que varia de 34% a 43%, o que deverá estar associado à extração de recursos para fabrico da diversa maquinaria (metálica em aço e em ferro, etc.), e da própria fábrica (constituída por tijolo, betão, aço, etc.). Para as restantes categorias a influência é diminuta e em regra inferior a 10%.

Tabela 45 – Contributo das infraestruturas (produção de bens capitais na abordagem do berço ao portão do revestimento) (%)

Categoria de impacte	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
Aquecimento global (GWP)	4	4	4	4	4	4	4	5
Acidificação (AP) – CML	9	6	9	7	7	7	7	9
Eutrofização (EP)	14	11	12	9	9	10	11	12
Oxidação fotoquímica (POCP) - CML	9	7	8	7	7	7	7	8
Depleção da camada de ozono (ODP)	4	4	3	4	4	4	4	5
Depleção de recursos abióticos (ADe)	68	85	85	90	90	89	90	89
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	4	4	4	4	4	4	4	5
Toxicidade humana, efeito cancerígeno	35	34	43	39	40	34	39	34
Toxicidade humana, efeito não- cancerígeno (HTnc)	13	13	13	14	15	13	15	13
Matéria particulada (PM2.5)	8	7	9	5	4	4	7	8
Uso do solo (LU)	46	45	48	54	48	53	45	40
Depleção da água (WD)	0	1	1	3	2	3	3	3
Ecotoxicidade (ET)	9	10	12	13	12	12	13	11
Acidificação (A+) - ILCD	9	7	9	7	7	7	7	9
Formação de ozono fotoquímico (POCP +) - ILCD	9	6	7	6	6	6	7	7

Assim, na elaboração de uma DAP usualmente não se incluem as infraestruturas, no entanto e pelo menos para a depleção de recursos abióticos elementos, uso do solo e toxicidade humana - efeito cancerígeno poderão ser relevantes.

#### 4.4.2.3 Comparação e discussão com outros estudos

Em regra, os valores obtidos para as diversas categorias de impacte no revestimento são inferiores aos obtidos no pavimento produzido a nível nacional (ver tabelas A.13 a A.16 em anexo), tal como seria expectável face ao menor peso específico médio, às menores exigências térmicas do revestimento e consequentemente menores emissões gasosas geradas, o que se reflete na maioria das categorias de impacte (aquecimento global, acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica, e depleção de recursos fósseis). Já a toxicidade humana e a ecotoxicidade são superiores no revestimento, tal como seria de esperar, uma vez que utilizam mais decorações, com um maior número de tintas e vidrados aplicados por m<sup>2</sup>, que contêm uma série de substâncias, nomeadamente metais pesados que contribuem para estas categorias. Relativamente às partículas, à depleção de água e ao uso do solo são categorias que se encontram semelhantes (em termos de ordem de grandeza) e que dependem também de outros fatores característicos da própria unidade como seja a eficiência dos sistemas de tratamento de efluentes gasosos (ex. filtros de



despoeiramento, filtro de fluoretos), a existência de recirculação de água tratada na ETARI, bem como as opções por tratamentos subsequentes dos ladrilhos cerâmicos. Quando a comparação é efetuada por unidade declarada mássica (1 kg) estas diferenças não são tão acentuadas.

Por outro lado, e conforme já mencionado para o pavimento cerâmico, a comparação com outros estudos pode apresentar algumas limitações, nomeadamente a função, o modo de expressão dos resultados, os métodos de avaliação de impactes (modelos de caracterização), bases de dados distintas ou atualizadas e ainda os produtos cerâmicos apresentarem características distintas. Adicionalmente, existe material de pavimento que pode ser aplicado como revestimento (devido a colas e adesivos de colagem), pelo que em muitos estudos referem a unidade funcional de 1 m<sup>2</sup>, mas não é totalmente explícita se é para pavimento ou revestimento, sendo de mencionar que o revestimento tal como definido neste trabalho (com carbonatos) não pode ser aplicado em pavimento.

Apesar das limitações, as principais conclusões de vários estudos já apresentados na Tabela 36 e na Tabela 37, são consistentes com os valores obtidos para os revestimentos cerâmicos portugueses analisados neste estudo, evidenciando também a etapa do berço ao portão (A1-A3) com os maiores contributos para a maioria das categorias de impacto em estudo, devido ao consumo de energia significativo, às atividades desenvolvidas na fábrica, à tipologia e transportes de matérias-primas, entre outros.

Os estudos de Benveniste et al. (2011) e Ibáñez-Forés et al. (2011, 2013) referem que o processo unitário de cozedura é o mais relevante na etapa do berço ao portão para as categorias avaliadas nomeadamente aquecimento global, acidificação e oxidação fotoquímica devido ao elevado consumo energético. Ao comparar os estudos de Benveniste et al. (2011), Bovea et al. (2010) e Ibáñez-Forés et al. (2011), utilizando o método CML 2001 (uma versão de fatores de caracterização anterior à usada no presente trabalho), os valores absolutos obtidos (Tabela 36) para as categorias consideradas de aquecimento global, acidificação, eutrofização e depleção da camada de ozono estão na mesma ordem de grandeza, existindo revestimento nacional com desempenho ligeiramente melhor e outro ligeiramente pior. Os fatores que explicam este comportamento podem estar associados a razões de diversa índole das quais se destaca os estudos espanhóis incluírem pavimento (que exige maiores temperaturas e logo maiores impactes) prejudicando a média; o tipo de agente de limpeza (não identificado nos estudos) e frequência de limpeza (não evidenciada); a existência de sistema de tratamento de efluentes gasosos a nível nacional, informação não explícita nos estudos espanhóis (usualmente inexistentes), e ainda o mix elétrico nacional que evoluiu favoravelmente em Portugal (com redução da maioria dos impactes).

De mencionar que, pelo contrário, as distâncias de transporte não devem justificar a variabilidade de comportamento, uma vez que nos estudos de Bovea et al. (2010) e Ibáñez-

Forés et al. (2011) as distâncias de transporte de matérias-primas (principalmente argila atomizada) e esmalte/vidrados são bastante inferiores (média de 20 km) aos verificados nos estudos de caso portugueses (onde a maioria das argilas e os esmaltes/vidrados foram importados do estrangeiro, e, neste último caso maioritariamente de Espanha).

Em termos de outros estudos de ACV do berço ao portão, foram já discutidos no capítulo dos pavimentos (item 4.3.3.3), particularmente os referentes aos EUA (Curran et al., 2002) e à China (Curran et al., 2002) e conforme mencionado também o desempenho do revestimento nacional é melhor (ex. aquecimento global atinge valores mais baixos).

No que se refere ao material para fachada em cerâmica produzida na China com 30 mm, Han et al. (2015) determinaram impactes de acordo com o método CML, verificando-se que são bastante superiores (dobro ou mesmo mais de 10 vezes) aos determinados para o revestimento nacional quando comparados por unidade funcional (1 m<sup>2</sup>), exceto ODP que é inferior, no entanto por unidade declarada (1 kg) estas diferenças são atenuadas, uma vez que a espessura é bastante superior à dos revestimentos nacionais.

Já quando se comparam os resultados na abordagem do berço ao portão do revestimento com os resultados presentes em DAPs de médias sectoriais (Tabela 37), com as limitações já conhecidas (nomeadamente serem médias de pavimentos e/ou revestimentos, composições de matérias-primas distintas, transportes de matérias-primas e auxiliares distintos, bem como metodologia de cálculo de impactes, etc.), os resultados nacionais obtidos, estão muito em linha com a DAP média italiana (Confindustria Ceramica, 2016), DAP americana (TCNA, 2014) e a DAP alemã (Industrieverband Keramische, 2011), que apresentam pesos específicos mais alinhados com os nacionais.

É de destacar que os valores mais alinhados são para o aquecimento global, oxidação fotoquímica e depleção de recursos abióticos fósseis. Já para a acidificação e eutrofização se verifica que os valores alcançados pelo revestimento português são, em regra, ligeiramente superiores aos italianos e alemães, mas inferiores aos americanos. Este facto poderá estar associado aos sistemas de tratamento de efluentes gasosos mais eficientes em Itália (usualmente injeção em linha seguida de filtros de manga) e na Alemanha. Já para a depleção de recursos abióticos elementos, os valores nacionais são em regra inferiores, tal como ocorreu para o pavimento, talvez associado ao tipo de matérias-primas, vidrados e decoração utilizados. Pelo contrário, para a depleção da camada de ozono os valores nacionais são sempre superiores aos determinados nos restantes países, pese embora esta categoria esteja associada a arrefecimentos na produção de energia (eletricidade e combustíveis) e muito pouco influenciada pelas atividades diretas desenvolvidas na fábrica.

#### 4.4.2.4 Potenciais medidas de melhoria do impacte ambiental

As medidas de melhoria propostas para o estudo de caso do pavimento podem ser todas aplicáveis ao desempenho de qualquer um dos revestimentos, embora a sua eficiência dependa das condições previamente existentes. De mencionar que o rótulo ecológico da EU, de acordo com os critérios estabelecidos na Decisão 2009/607/CE (Comissão Europeia, 2009b), incluído nas medidas IA7 e IA8, é um instrumento que não se aplica diretamente ao revestimento mas apenas ao pavimento cerâmico. No entanto, o desempenho previsto no rótulo ecológico poderá ser aplicado.

Assim, e com vista a averiguar a eficácia das medidas de melhoria foi selecionado o RC2, tendo-se escolhido este revestimento por ser conformado em ciclo completo por prensagem (processo mais comum), possuir ainda potencial prático de melhoria, uma vez que não dispõe ainda de sistema de tratamento de fim de linha (ex. MTDs) entre outras. As medidas testadas foram as já apresentadas para o pavimento:

- A) medidas a implementar na fábrica cerâmica (local de produção) (IA1 ou IA 2, IA3 e IA7);
- B) medidas de minimização do transporte de matérias-primas (IA5);
- C) medidas que combinam as duas categorias anteriores (IA4, IA6 e IA8).

A descrição de cada uma destas medidas pode ser consultada no item 4.3.3.4.

No que se refere a IA7 e IA8, que integram a implementação do rótulo ecológico, refira-se que apenas os valores de desempenho em termos de emissões (ver Tabela 38) foram ajustados, o que é tecnicamente viável em RC2 recorrendo a um filtro (MTD que a empresa não dispõe), uma vez que os restantes (ex. energia e água) são já satisfeitos. No caso de IA8 para além de combinar IA7 e IA5 (transporte) como no pavimento, inclui ainda IA4, sendo o cenário que reúne a opção máxima de desempenho ambiental.

A Tabela 46 apresenta a quantificação da redução do impacte ambiental (expressa em %) em relação ao desempenho inicial do RC2 para todas as ações de melhoria sugeridas (cenários).

Da análise da Tabela 46 verifica-se que IA7 (medidas para alcançar o desempenho ambiental do rótulo ecológico, nomeadamente filtro), com a redução significativa de poluentes gasosos (partículas, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl e HF), tem reduções significativas a nível de categorias de impacte como acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e partículas, sendo a mais eficaz do conjunto de medidas individuais (IA1, IA2, IA3, IA5 e IA7).

Verifica-se ainda que IA1 (recuperação do ar quente da zona de arrefecimento do forno para a sua posterior reutilização nos queimadores do forno), medida que visa reduzir consumos energéticos na cozedura, reduz categorias de impacte mais associadas à combustão (aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção de recursos fósseis,

oxidação fotoquímica, depleção da camada de ozono, e partículas (PM<sub>2,5</sub>)), embora com um impacto pouco expressivo.

Tabela 46 - Percentagem de redução alcançada por unidade funcional (1 m<sup>2</sup>)

Categoria de impacto - redução (%)	IA1	IA2	IA3	IA4	IA5	IA6	IA7	IA8
Aquecimento global (GWP)	3,8	1,5	2,3	5,5	1,3	6,8	3,0	7,0
Acidificação (AP) - CML	2,7	1,1	3,0	5,7	1,1	6,8	13,6	19,2
Eutrofização (EP)	2,1	0,9	2,8	4,9	2,3	7,3	13,0	19,0
Oxidação fotoquímica (POCP) - CML	4,4	1,8	0,6	5,0	1,7	6,7	0,1	6,9
Depleção da camada de ozono (ODP)	2,8	1,2	2,5	5,3	0,8	6,1	12,4	17,4
Depleção de rec. abióticos (ADe)	0,1	0,0	1,9	1,9	0,0	2,0	0,0	2,0
Depleção de rec. abióticos fósseis (ADf)	4,0	1,6	1,3	5,3	1,4	6,7	0,3	7,1
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	0,4	0,2	0,6	1,0	3,7	4,7	0,9	4,7
Tox. humana, efeito cancerígeno (HTc)	0,3	0,1	0,7	1,0	0,2	1,2	0,8	1,2
Matéria particulada (PM <sub>2.5</sub> )	1,6	1,2	1,4	3,0	1,3	4,3	27,7	31,5
Uso do solo (LU)	0,0	0,0	1,2	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2
Depleção da água (WD)	0,1	0,0	5,6	5,6	0,2	5,8	0,0	5,8
Ecotoxicidade (ET)	0,9	0,0	1,2	2,1	12,2	14,3	0,6	14,9
Acidificação (A+) - ILCD	2,7	1,1	2,9	5,6	1,2	6,9	13,9	19,5
Formação de ozono fotoquímico (POCP +) - ILCD	3,5	1,4	1,4	4,9	1,8	6,7	9,8	15,5

Já IA8, que envolve medidas associadas a poupança energética (consumo de gás natural e eletricidade), redução de poluentes e transportes, constitui a medida com o máximo potencial de redução de desempenho ambiental, logo e tal como seria de esperar, é a mais eficaz para a redução de todas as categorias de impacto ambiental, mas principalmente partículas, acidificação, eutrofização e oxidação fotoquímica.

Constata-se ainda que as medidas IA1, IA2, IA3 e IA4 têm uma eficiência muito semelhante à obtida para o pavimento (ver Tabela 40). Já IA5 (e consequentemente IA6) tem uma menor eficiência, tal como seria de esperar uma vez que a redução das distâncias percorridas pelas matérias-primas não é tão significativa como no pavimento. IA7 e IA8 têm uma maior eficiência no revestimento, em algumas das categorias, reflexo da empresa onde se fabrica o RC2 que não possui qualquer tipo de tratamento de efluentes gasosos. Mais se refere que o diferencial nas categorias de acidificação e oxidação fotoquímica pelo CML-IA e pelo ILCD é semelhante.

#### 4.4.3 Conclusão

Da análise dos resultados e do trabalho desenvolvido no decorrer desta ACV ao revestimento cerâmico, podemos concluir que:

- os revestimentos estudados apresentam alguma variabilidade de impactes (em regra na ordem dos 30% e que oscilam de 2% a 56%), verificando-se no geral que os menores impactes por unidade funcional ( $m^2$ ) ocorrem para as menores espessuras e/ou formatos, nomeadamente RP8, RP7 ou para o ladrilho vermelho (VC3) em algumas categorias, enquanto os maiores registam-se para RP4 e RP5. Esta variabilidade pode ser importante, quando se realizam estudos de definição de melhores desempenhos (benchmarks) ou DAPs sectoriais;
- esta variabilidade está relacionada com fatores como a tipologia e composição de matérias-primas (e seu transporte), a espessura do material produzido, e decoração (tipologia de vidro e tratamento subsequente) e com menor significado com a condução de forno, entre outros, já que o mix elétrico e a produção de combustíveis são comuns às diversas unidades industriais. Para a toxicidade humana, ecotoxicidade, e depleção da água ocorre um comportamento mais associado a fatores aplicados por área como seja a quantidade de vidro aplicado, processos subsequentes de tratamento do material (ex. amaciamento ou polimento), e/ou a existência de processos de recirculação da água;
- os impactes determinados para o revestimento em ciclo completo e em ciclo parcial não são substancialmente diferentes, porém o ciclo completo apresenta um melhor desempenho para a maioria das categorias. Para a depleção da água, as fábricas em ciclo completo são mais eficientes pois reciclam mais água nomeadamente na secção de preparação de pasta (inexistente nas de ciclo parcial) e em lavagens;
- a dispersão de valores de impactes por unidade declarada (1 kg) é menor do que a obtida por unidade funcional (1  $m^2$ ) para as categorias aquecimento global, acidificação, oxidação fotoquímica, depleção da camada de ozono e recursos fósseis, podendo ser explicado pela diferente espessura dos materiais e influência de processos com necessidades térmicas elevadas (cozedura, atomização e secagem). Já para a eutrofização, toxicidade humana, ecotoxicidade e a depleção de recursos elementos e água, a dispersão é menor por  $m^2$  do que por kg, pois as operações mais influentes são aplicadas por área (aplicação de vidro, polimento, etc.). Este comportamento não é tão acentuado como verificado para o pavimento;
- a etapa do berço ao portão (A1 a A3) é a mais significativa para todas as categorias de impacto exceto uso do solo e depleção da água, onde a etapa de uso (B) é a preponderante, e ainda para a ecotoxicidade onde o transporte (A4) é o mais relevante. A etapa da construção (A4-A5), que inclui o transporte e a aplicação do

ladrilho em obra, apresenta-se como a segunda maior contribuição para a depleção de recursos elementos e para a toxicidade humana cancerígena. Já a etapa de fim de vida (C) é a segunda mais relevante para a categoria de impacto das partículas (PM2.5) relacionada com as atividades de demolição e desconstrução;

- dentro da etapa de produto (A1 a A3) verificou-se que a “produção de matérias-primas e auxiliares” é dominante para a depleção de recursos abióticos, toxicidade humana e para determinadas categorias nos ladrilhos em ciclo parcial; a “produção de embalagem” é o processo dominante para o uso do solo devido ao contributo das paletes de madeira; a “produção de combustíveis” é o maior contribuinte para a depleção da camada de ozono (exceto RP8) e depleção de recursos fósseis; a “produção da eletricidade” é o processo dominante para a acidificação, depleção da água, oxidação fotoquímica e eutrofização mas apenas para o ciclo completo; enquanto as “atividades que decorrem na fábrica” contribuem para o “aquecimento global” nas de ciclo completo e PM2.5 (em alguns revestimentos); finalmente o “transporte” é relevante para a ecotoxicidade (ciclo completo e segunda posição para ciclo parcial);
- as infraestruturas acarretam apenas um contributo relevante para a depleção de recursos elementos, uso do solo e ainda a toxicidade humana - cancerígeno;
- o revestimento possui melhor desempenho do que o pavimento para a maioria das categorias pois possui menores espessuras, menor consumo energético, exceto para a toxicidade humana e a ecotoxicidade que são superiores, já que utiliza mais decorações. As categorias associadas à depleção da água, uso do solo e partículas (PM2.5) são mais específicas do contexto de cada instalação fabril;
- as medidas individuais estudadas mais eficazes para a redução de impactes são aquelas que conduzem ao desempenho do rótulo ecológico (menos eficaz economicamente) e a redução de consumos energéticos na cozedura. A conjugação destas duas medidas e a redução do transporte (IA8) assume-se mesmo como a mais eficaz das estudadas, embora a mais dispendiosa;
- o estudo destas medidas comprovou a influência do consumo de energia, emissões gasosas, distância de transporte e substâncias existentes nos vidrados, engobes e decorações (nomeadamente metais pesados) no desempenho ambiental;
- a acidificação apresenta um comportamento semelhante quando determinada pelo CML-IA e ILCD, enquanto a oxidação fotoquímica exhibe comportamento distinto, tal como no pavimento, já que os métodos apresentam fatores de caracterização e algumas substâncias distintas.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## 5 Considerações finais

### 5.1 Conclusões gerais

Com este trabalho pretendeu-se aprofundar o conhecimento sobre os impactes ambientais de um conjunto de materiais cerâmicos utilizados na construção, nomeadamente tijolo, telha, pavimento e revestimento, bem como estudar variáveis de influência (tecnológicas, temporais e metodológicas) e medidas de melhoria do seu desempenho ao longo do ciclo de vida, dotando simultaneamente estes subsectores de ferramentas e estratégias de forma a poder apoiar a tomada de decisão na implementação e concretização de um investimento ou MTD de forma mais sustentada. Assim, com base na identificação das cargas ambientais (entradas e saídas) e na quantificação de impactes ambientais para um conjunto alargado de categorias de impacto (para além das tradicionais em materiais de construção (EN 15804+A1:2013) particularmente algumas previstas pela PAP (ainda não avaliadas para estes materiais)), foram identificados pontos críticos para os quais foram testadas medidas de melhoria de desempenho, apontando assim potenciais estratégias a adotar pelo tecido industrial.

Deste modo, em termos gerais, as principais conclusões resultantes do presente trabalho de ACV são as seguintes:

- a ACV é uma ferramenta adequada para os materiais cerâmicos de construção, permitindo a identificação de áreas críticas, de forma a minimizar o seu impacto ambiental e potenciar a melhoria do desempenho ambiental;
- a etapa do berço ao portão é a mais relevante para todos os materiais cerâmicos em estudo para a grande maioria das categorias de impacto ambiental; a etapa de uso é a mais significativa para a eutrofização, depleção da água, uso do solo e/ou ecotoxicidade, mas apenas para o pavimento e revestimento; o transporte do produto, função do cenário, pode ser preponderante para a ecotoxicidade no caso do revestimento;
- dentro da abordagem do berço ao portão, os processos que contribuem mais para os impactes variam em função da categoria de impacto e, em alguns casos, também do tipo de produto cerâmico. A “produção de matérias-primas e auxiliares” é relevante para a depleção de recursos abióticos e toxicidade humana (caso dos ladrilhos), enquanto a “produção de embalagem” é o processo dominante para o uso do solo. Já o “transporte” é o processo dominante para a ecotoxicidade e toxicidade não cancerígena (apenas para a telha). A “produção da eletricidade” é o processo dominante ou segundo relevante para várias categorias com destaque



para a acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e depleção da água. A “produção de combustíveis” é o maior contribuinte para a depleção de recursos fósseis e para a depleção da camada de ozono, enquanto as “atividades que decorrem na fábrica” contribuem maioritariamente para o aquecimento global e partículas, e em menor escala para acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica e depleção da água;

- dentro das “atividades que decorrem na fábrica”, o processo unitário de cozedura é o mais crítico para todos os produtos pois apresenta maior consumo de energia (maiores necessidades térmicas face às temperaturas exigidas) e uma maior emissão de poluentes para a atmosfera;
- verificam-se variabilidades significativas nos impactes ambientais determinados dentro de cada tipologia de material cerâmico induzidas por diferenças tecnológicas, realçando-se para o tijolo a influência significativa do tipo de combustível (biomassa, coque de petróleo, gás natural ou mista), enquanto na telha é o tipo de enforna na cozedura (existência ou não de mobília refratária) e a presença de sistemas de tratamento de efluentes gasosos. Já nos ladrilhos as variáveis são a espessura do material, tipologia de matérias-primas (e sua origem), tipologia de produto final, modo de conformação (prensado vs extrudido), quantidade de vidrado e tratamento subsequente. Neste contexto, a possibilidade de junção de várias tipologias de materiais para a mesma função em média sectorial, DAP média ou PAP média poderá não transparecer o impacte real, já que a variabilidade de impactes determinada é relevante;
- a variabilidade de resultados apresentada nesta tese demonstra ainda que a avaliação de impactes ambientais da indústria cerâmica deve ser realizada com dados específicos;
- a influência dos combustíveis na produção do tijolo revelou-se significativa para a grande maioria das categorias de impacte, com o coque de petróleo a obter os piores resultados e o gás natural ou a biomassa (embora esta em menos categorias) com os melhores, corroborando o gás natural como MTD. A evolução de impactes de 2008 para 2016 revelou-se desfavorável nos casos com biomassa e gás natural, face a uma menor eficiência do processo (motivada pela crise económica); já para o coque, a evolução foi favorável de 2008 para 2016, face ao modo de utilização do coque (forma micronizada cuja combustão é mais eficaz) e aos dados de produção de coque de petróleo inseridos na ecoinvent 3.3 (subproduto de baixo valor, usado para 2016) face à ecoinvent 2.2 (utilizado para 2008);
- no caso da telha, a tecnologia com refratário (T2) apresenta maiores impactes que a tecnologia com arame (T1) para grande parte das categorias de impacte,

associado principalmente ao consumo energético adicional do material refratário na etapa do berço ao portão;

- registou-se melhoria do desempenho ambiental da telha de 2005/2006 para 2014, consequência de menores consumos específicos de energia e da melhoria do mix elétrico nacional, uma vez que processo tecnológico (modo de fabrico e combustível) se manteve;
- os ladrilhos (pavimento ou revestimento) em ciclo completo e em ciclo parcial (a preparação de pasta realizada numa unidade exterior) apresentam desempenho ambiental semelhante, exceto na depleção da água, uma vez que as fábricas em ciclo completo são mais eficientes já que reciclam mais água, nomeadamente na secção de preparação de pasta (inexistente nas de ciclo parcial);
- o revestimento possui melhor desempenho do que o pavimento para a maioria das categorias de impacto, exceto para a toxicidade humana e a ecotoxicidade que são superiores no revestimento, uma vez que utiliza mais decorações;
- para os ladrilhos (produtos mais complexos) a dispersão de valores dos impactes por massa (kg) é menor para as categorias aquecimento global, acidificação, eutrofização, oxidação fotoquímica, depleção da camada de ozono, depleção de recursos fósseis, depleção de recursos elementos, partículas, podendo-se inferir que dependem mais da massa do ladrilho. Já para a toxicidade humana, ecotoxicidade, uso do solo e depleção da água, a dispersão de valores é menor por unidade funcional (m<sup>2</sup>) pois as operações que mais influenciam são aplicadas por área (aplicação de vidro, engobe, tratamento de polimento, etc.);
- a evolução temporal no pavimento reflete uma maior estabilidade do processo tecnológico (processo de fabrico e combustível) denotando-se uma retoma da produção em 2014/2015 que acarretou um ligeiro agravamento de impactes associados à depleção de recursos fósseis, depleção da camada de ozono e alterações climáticas, porém a eutrofização apresentou-se mais baixa face às melhorias do mix elétrico nacional;
- a implementação de instrumentos e políticas europeias (ex. BREF, rótulo ecológico, eficiência energética) conduz à melhoria do desempenho ambiental dos ladrilhos em estudo, sendo o rótulo ecológico a mais eficaz. A redução de distâncias rodoviárias (substituição de matérias-primas estrangeiras por nacionais) é também eficaz, podendo servir de critério em futuras revisões de instrumentos ambientais;
- a opção de reciclagem no fim de vida, simulada para as paredes de tijolo, conduz a reduções dos impactes para mais de metade, para a maioria das categorias de impactes face ao aterro. O seu impacto no ciclo de vida completo é, porém, pouco relevante face às restantes etapas do ciclo de vida;

- os métodos CML-IA e ILCD dão origem a resultados semelhantes para a acidificação mas não para a oxidação fotoquímica devido à consideração de diferentes fatores de caracterização e substâncias, influenciando a relevância relativa dos processos unitários para essa categoria de impacto;
- as infraestruturas são pouco significativas para a maioria das categorias de impacto (em regra inferior a 10%), no entanto, possuem uma importância significativa para a depleção de recursos abióticos, uso do solo, toxicidade humana e ecotoxicidade;

## **5.2 Sugestões para melhoria do desempenho ambiental dos produtos cerâmicos**

Face aos impactos determinados e de forma a melhorar o desempenho ambiental dos materiais cerâmicos propõem-se as seguintes recomendações:

- recurso a matérias-primas sempre que possível locais de forma a minimizar deslocamentos;
- desenvolvimento de pastas cerâmicas que possam ser sinterizadas a temperaturas mais baixas, por exemplo com recurso a fundentes, e desse modo possam reduzir as necessidades térmicas e consequentes emissões;
- introdução de agentes de promoção da porosidade (ex. aditivos orgânicos como a biomassa) em composições de pastas de tijolos que reduzam as necessidades térmicas;
- medidas de racionalização energética, incluindo o reaproveitamento de calor de fornos (ar quente da zona de arrefecimento) para a secagem (secadores ou atomizadores);
- desenvolvimento de tecnologias de cozedura e/ou conceção de fornos que possam promover uma redução de consumos e emissões, promovendo estratégias de neutralidade carbónica (ex. novos processos de cozedura com recurso a novas formas de recursos energéticos como o hidrogénio, ou fornos totalmente elétricos);
- promoção de medidas de confinamento e redução das emissões (ex. transportes pneumáticos em vez de transportes em tapetes; confinamento de parques de armazenamento de matérias-primas; implementação de sistemas de humidificação de matérias-primas; implementação de sistemas de despoeiramento) que promovam a redução de partículas;
- desenvolvimento de isolamentos térmicos, refratários e outros que possam reduzir as necessidades térmicas na atomização, secagem e cozedura;

- minimizar ou evitar o uso de metais pesados nas decorações e vidrados, uma vez que estes elementos condicionam categorias de impacto como sejam a toxicidade humana, ecotoxicidade e a depleção de recursos abióticos;
- uso de tecnologia de cozedura em monocozedura;
- implementar medidas de eco-design (considerações de pensamento de ciclo de vida em todas as etapas de forma a minimizar impactes, como sejam redução da embalagem (incluindo a gramagem da embalagem), gestão adequada de recursos minerais, minimizar e otimizar o percurso de transportes, gestão de recursos energéticos incluindo a sua recuperação, reaproveitamento de resíduos, etc.);
- implementar estratégias de economia circular de forma a aumentar a eficácia da utilização de recursos, tais como, reutilização, reparação, renovação e reciclagem dos materiais e produtos existentes, ou seja, o que era visto como um “resíduo” pode ser transformado num recurso ou matéria-prima secundária, de forma a minimizar impactes nas etapas de extração, produção e fim de vida, reduzindo deste modo a dependência de materiais primários e de energia.

### **5.3 Recomendações**

Com base nos resultados obtidos nesta tese, considera-se existir potencial para a melhoria da EN 15804+A1:2013 (CEN, 2013), bem como para tecer alguns contributos para o desenvolvimento de RCP, incluindo no âmbito da PAP, para materiais de construção nomeadamente cerâmicos, tais como:

- a regra de alocação de 0,5% baseada na massa (propriedade física) provou ser adequada para o tijolo cerâmico, facilitando o processo de recolha de dados de inventário;
- o uso de dados específicos é relevante durante o módulo de produção devido ao grande impacto desta etapa para todos os materiais cerâmicos e à influência de variáveis tecnológicas (processuais, combustíveis, entre outras) no desempenho ambiental;
- a definição de médias e de melhores desempenhos ambientais (“benchmarks”) deve ser específica por tipologia de material cerâmico para alguns produtos como o pavimento (ex. grés porcelânico por prensagem; grés porcelânico por extrusão, pavimento em base vermelha), alinhando com os grupos previstos na EN 14411:2016 (CEN, 2016), face à sua influência na determinação de impactes;
- o critério de validade de 5 anos, na aceção da EN15804+A1:2013, poderá não transparecer os impactes do produto nesse período principalmente se existirem

melhorias ou piorias de desempenho, por razões de conjuntura, sem modificações de processo de fabrico e/ou combustíveis, recomendando-se antes critérios de variabilidade de dados de entrada e de saída;

- as categorias de impacto relacionadas com a toxicidade, ecotoxicidade, depleção da água, uso do solo, partículas inorgânicas respiratórias (PM2.5), e respetivos métodos de AICV devem ser consideradas como indicadores adicionais à EN15804+A1:2013 (CEN, 2013), já que os considerados nesta norma não são suficientes para espelhar o desempenho ambiental. De mencionar que as partículas são relevantes em materiais de construção quer a nível de aspetos ambientais monitorizados e controlados quer a nível económico (investimentos relevantes em sistemas de tratamento de efluentes gasosos).

Finalmente, e considerando o reduzido número de estudos de ACV existentes nomeadamente para o tijolo de furação horizontal, telha e revestimento (específico), os dados de inventário e os resultados no presente trabalho poderão contribuir para futuros desenvolvimentos de normalização, estudos comparativos, bases de dados, estruturar e potenciar novas estratégias eco-inovadores de redução de impactes e que possam contribuir simultaneamente para uma economia mais circular com vista a uma construção sustentável.

### **5.4 Limitações e perspetivas para trabalhos futuros**

A obtenção de dados de ICV para os estudos de caso surgiu como o principal constrangimento, particularmente nos ladrilhos, sendo de destacar o conhecimento das composições das decorações (vidros, engobes, fritas, corantes), uma vez que os fornecedores são estrangeiros e não disponibilizam a composição exata por questões de confidencialidade. Assim, e para ultrapassar esta questão, recorreu-se a informação das fichas de dados de segurança desses materiais, fichas técnicas dos materiais, bibliografia da especialidade nomeadamente o documento de referência das MTD da indústria do vidro (European Commission, 2012) e ainda diversos contactos com especialistas no sector.

Por outro lado, o método do CML sofreu atualizações particularmente na categoria de depleção de recursos abióticos, conforme comentado ao longo do capítulo 4. Igualmente, a base de dados Ecoinvent foi evoluindo ao longo do período de realização da tese, pelo que se optou por efetuar novo levantamento para dados para anos mais recentes e colocar todos os dados de ICV na última versão Ecoinvent 3.3 (Ecoinvent, 2014), evidenciando-se e justificando algumas diferenças (estudo de caso do uso de coque no fabrico de tijolo).

Face às limitações resultantes da utilização de bases de dados Europeias, deveriam ser criadas bases de dados nacionais com dados e impactes ambientais locais de matérias-primas, matérias auxiliares, embalagem, entre outros materiais e produtos ao longo do seu ciclo de vida, de modo a complementar a ausência de dados específicos atualmente verificada. A utilização destes dados nacionais, poderia garantir uma melhor representatividade geográfica face à natureza das matérias-primas, bem como estimular e suportar ferramentas como as compras públicas ecológicas, ecodesign ou estratégias de economia circular visando a procura por bens e serviços mais sustentáveis, constituindo um importante estímulo à eco-inovação e ao desenvolvimento sustentável.

Tendo por base o trabalho de ACV desenvolvido, sugere-se a continuidade da aplicação da metodologia da ACV a outros materiais de construção e a cerâmicos utilizados nos edifícios de construção, nomeadamente os tijolos face-à-vista (menos utilizado em Portugal), fachadas ventiladas, agregados leves e ainda nas operações de acabamentos, como sejam os sanitários, de forma a facultar aos produtores destes materiais estratégias sustentadas de minimização de impactes ambientais, bem como prestar informações ambientais válidas e idóneas aos prescritores e projetistas que permitam selecionar os materiais com menor impacto ambiental (e custo-eficazes), permitindo uma construção mais sustentável.

Por outro lado, considerando as estratégias europeias e nacionais em termos de economia circular, nomeadamente as iniciativas de uma “Europa eficiente em termos de recursos” e o “Plano de Ação para a Economia circular em Portugal”, enfocando na manutenção dos produtos e materiais na cadeia de valor o mais possível, ou seja prolongando o seu ciclo de vida de forma sustentável, a relevância da reutilização e/ou reciclagem dos materiais no fim de vida é crucial. Neste contexto, seria importante desenvolver e analisar em detalhe o fim de vida dos materiais cerâmicos, nomeadamente a partir da análise de sensibilidade realizada à reciclagem no estudo de caso do tijolo. Os materiais cerâmicos em fim de vida poderão constituir-se como matéria-prima secundária noutros processos do sector da cerâmica ou outros sectores industriais como seja construção civil, incorporando os cacos em cimento, argamassas, betão, pavimentos betuminosos e agregados, os solos artificiais e mesmo a recuperação de caminhos, enchimento de cotas e pavimentação de campos de ténis (Almeida et al., 2017). Além destes sectores, uma percentagem considerável destes cacos poderá ser incorporada na própria composição cerâmica.

Em termos de evolução da política energética e clima seria ainda relevante avaliar os impactes de cenários para os produtos de construção cerâmicos de cenários de redução drástica da dependência de combustíveis (ex. uso de energia renovável), ainda que no estado da arte atual não seja possível tecnologicamente nestes subsectores.

Como complemento deste trabalho, recomenda-se ainda uma análise da relevância das diferentes categorias de impacto através de novas técnicas em desenvolvimento como a monetização, ou seja transformar os impactes ambientais em valor económico através da

aplicação de fatores de conversão de cada indicador da categoria de impacte ambiental (Almeida et al., 2016c).

Finalmente, recomenda-se o desenvolvimento de ferramentas de formação ou sensibilização de diferentes atores da cadeia de valor dos produtos da cerâmica de construção (fabricantes, projetistas, arquitetos, prescritores, construtores civis, utilizadores) para as questões ambientais identificadas ao longo do ciclo de vida e estratégias para a melhoria do desempenho ambiental de forma a contribuir para a eco-inovação e para o desenvolvimento sustentável.

## 6 Referências bibliográficas

(s.d.).

- Abd Rashid, A.F., Yusoff, S., 2015. A review of life cycle assessment method for building industry. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 45, 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.043>
- ACIMAC, MECS, 2017. World production and consumption of ceramic tiles. ACIMAC- Associazione Costruttori Italiani macchine attrezzature per ceramica; MECs - Machinery Economic Studies, Baggiovara, Italy.
- AFNOR, 2011. Bp X30-323 - Référentiel de bonnes pratiques. Association Française de Normalisation, France.
- Ahbe, S., Braunschweig, A., Muller-Wenk, R., 1990. Methodik fu"rO" kobilanzen auf der Basis o"kologischer Optimierung, Bundesamt fu"r Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- Albino, V., Kühtz, S., 2004. Enterprise input-output model for local sustainable development - The case of a tiles manufacturer in Italy. *Resour. Conserv. Recycl.* 41, 165–176. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2003.09.006>
- Almeida, M.I., 2011. Rótulos e declarações ambientais. *Kéramica* 308, 6–12.
- Almeida, M.I., Barata, J., Dias, A.C., Arroja, L., 2015a. Environmental product declaration of ceramic roof tiles: a case study of information requirements within the life cycle, in: *Energy for Sustainability 2015 Conference (EfS 2015)*. Coimbra, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A., Arroja, L., 2013a. Environmental product declaration for ceramic tile, in: *Energy for Sustainability 2013 Conference (EfS 2013)*. Coimbra, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2016a. Environmental product declaration – New challenges , new impact categories . Case study applied to ceramic floor tiles ., in: *Congresso de Inovação Na Construção Sustentável - CINCOS' 16. Plataforma para a Construção Sustentável*, Lisboa, pp. 175–188.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2014a. Declaração ambiental de produto - Caso de estudo de fundamentação de impactes na telha cerâmica, in: *Congresso de Inovação Na Construção Sustentável - CINCOS' 14. Plataforma para a Construção Sustentável*, Porto, Portugal, pp. 125–133.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2014b. Avaliação de ciclo de vida de ladrilho cerâmico e seu potencial de melhoria, in: *Congresso de Inovação Na Construção Sustentável -*



- CINCOS '14 Construção Sustentável - CINCOS '14. Plataforma para a Construção Sustentável, Porto, Portugal, pp. 399–411.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2013b. Avaliação de ciclo de vida de ladrilhos cerâmicos, in: 10ª Conferência Nacional Do Ambiente XII Congresso Nacional de Engenharia Do Ambiente. Aveiro, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2012. Avaliação do ciclo de vida de revestimentos de cerâmica, in: Congresso de Inovação Na Construção Sustentável - CINCOS' 12. Plataforma para a Construção Sustentável, Aveiro, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2011a. Environmental product declaration in Portuguese ceramic tile, in: Bartolo et al (Ed.), International Conference on Sustainable Intelligent Manufacturing. IPL Leiria, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Castanheira, É.G., Arroja, L., 2011b. Environmental product declaration in ceramic materials as sustainability tool, in: LCM 2011 - Towards Life Cycle Sustainability Management. Berlin, Germany.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Demertzi, M., Arroja, L., 2016b. Environmental profile of ceramic tiles and their potential for improvement. J. Clean. Prod. 131, 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.131>
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Demertzi, M., Arroja, L., 2015b. Contribution to the development of product category rules for ceramic bricks. J. Clean. Prod. 92, 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.073>
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Dias, B., Arroja, L., 2010a. Life cycle assessment (cradle to gate) of a Portuguese brick, in: Conferência Internacional Portugal SB10: Sustainable Building Affordable to All. iiSBE, Universidade do Minho, Instituto Superior Técnico, Vilamoura, Portugal, pp. 477–482.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Dias, B., Castanheira, E., Arroja, L., 2010b. Avaliação de impactes no fabrico de pavimento e revestimento cerâmico, in: Congresso de Inovação Na Construção Sustentável - CINCOS' 10. Plataforma para Construção Sustentável, Anadia, Portugal, pp. 399–411.
- Almeida, M.I., Dias, B., Francisco, V., Amado, A., Simões, F., 2017. Análise da viabilidade da aplicação de estratégias de economia circular na indústria cerâmica. Kéramica 345, 8–13.
- Almeida, M.I., Dias, B., Lopes, K., Ferreira, V., 2014c. DAPHabitat – o sistema nacional de registo de declarações ambientais de produtos para o Habitat, in: Congresso de Inovação Na Construção Sustentável - CINCOS '14. Porto, Portugal.
- Almeida, M.I., Frade, P., Campante, H., Marques, J., Correia, A.M.S., 2001. A redução do teor em flúor nos efluentes gasosos da indústria cerâmica. Kéramica 246, 14–23.
- Almeida, M.I., Frade, P., Rodrigues, S., Machado, S., Simões, F., 2016c. Environmental performance in brickworks and assessing the cost / benefit of BAT, in: Congresso de Inovação Na Construção Sustentável - CINCOS '16. Plataforma para a Construção Sustentável, Lisboa, Portugal, pp. 151–168.

- Almeida, M.I., Machado, S., 2009. Novos critérios para conferir o rótulo ecológico a revestimentos cerâmicos. *Kéramica* 294, 6–12.
- Almeida, M.I., Serrano, A., Frade, P., 2003. O coque de petróleo. *Kéramica* 258, 78–90.
- Amoêda, R.P.C., 2009. Design for deconstruction: emergy approach to evaluate deconstruction effectiveness. (Tese de Doutorado da Escola de Arquitectura da Universidade do Minho, Portugal).
- Anderson, J., Thornback, J., 2012. A guide to understanding the embodied impacts of construction products. Construction Products Association.
- ANFACER, 2017. A indústria brasileira de cerâmica para revestimento [WWW Document]. URL <https://www.anfacer.org.br/brasil> (accessed 8.8.17).
- APICER, 2018. Comércio Internacional de Produtos - Ano de 2017. Coimbra, Portugal.
- APICER, 2017. Portal da APICER - Associação Portuguesa das Indústrias de Cerâmica e Cristalaria [WWW Document]. URL [www.apicer.pt](http://www.apicer.pt) (accessed 8.8.17).
- APICER, 2016. Estatísticas cerâmica [WWW Document]. Portal da cerâmica. URL [www.ceramica.pt](http://www.ceramica.pt) (accessed 8.5.16).
- Asif, M., Muneer, T., Kelley, R., 2007. Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Build. Environ.* 42, 1391–1394. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.023>
- BDA, 2014. Environmental Product Declaration: Brick Development Association generic brick.
- Belussi, L., Mariotto, M., Meroni, I., Zevi, C., Dei, S., 2015. Technical note LCA study and testing of a photovoltaic ceramic tile prototype. *Renew. Energy* 74, 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.053>
- Benveniste, G., Gazulla, C., Fullana, P., Celades, I., Ros, T., Zaera, V., Godes, B., 2011. Análisis de ciclo de vida y reglas de categoría de producto en la construcción. El caso de las baldosas cerámicas. *Inf. la Construcción* 63, 71–81. <https://doi.org/10.3989/ic.10.034>
- Bersimis, S., Georgakellos, D., 2013. A probabilistic framework for the evaluation of products' environmental performance using life cycle approach and Principal Component Analysis. *J. Clean. Prod.* 42, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.038>
- Bio by Deloitte, 2014. Investigating options for different compliance systems for PEF and OEF declarations. Final report prepared for the European Commission – DG Environment, in partnership with IEEP and Ecologic, A project under the framework contract ENV.F.1/FRA/2010/0044.
- BJorn, A., Zwicky, M., Ropke, I., Richardson, K., 2015. Better, but good enough? Indicators for absolute environmental sustainability in a life cycle perspective (PhD thesis). Technical University of Denmark (DTU), Denmark.
- Boustead, I., 1974. Resource implications with particular reference to energy requirements for glass and plastic milk bottles. *Int J Dairy Technol* 27, 159–165.

- <https://doi.org/10.1111/j.1471-0307.1974.tb01694.x>
- Bovea, M.D., Díaz-Albo, E., Gallardo, A., Colomer, F.J., Serrano, J., 2010. Environmental performance of ceramic tiles: Improvement proposals. *Mater. Des.* 31, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.021>
- Bragança, L., Mateus, R., 2011. Avaliação do ciclo de vida dos edifícios: Impacte ambiental de soluções construtivas.
- Bribián, I.Z., 2010. Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España. Tesis doctoral. Zaragoza.
- Bribián, I.Z., Capilla, A.V., Usón, A.A., 2011. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build. Environ.* 46, 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
- BSI, 2011. Publicly available specification PAS 2050:2011 - Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British Standards Institution, London, England.
- Cabeza, L.F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., Castell, A., 2014. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Cellura, M., Longo, S., Mistretta, M., 2011. Sensitivity analysis to quantify uncertainty in Life Cycle Assessment : The case study of an Italian tile. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 4697–4705. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.082>
- CEN, 2016. EN 14411:2016 - Ceramic tiles - Definition, classification, characteristics, assessment and verification of constancy of performance and marking. European Committee for standardization, Brussels, Belgium.
- CEN, 2013. EN 15804:2012+A1 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. European Committee for standardization, Brussels, Belgium.
- CEN, 2010. CEN/TR 15941:2010 - Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Methodology for selection and use of generic data. European Committee for standardization, Brussels, Belgium.
- Center for Clean Products, 2009. Life-cycle assessment of cladding products: A comparison of aluminum, brick, granite, limestone, and precast concrete. University of Tennessee, Tennessee, EUA.
- Cerame-Unie, 2017. European ceramic industry - Facts & figures [WWW Document]. URL <http://cerameunie.eu/ceramic-industry/facts-figures> (accessed 10.5.17).
- Cerame-Unie, 2012. Paving the way to 2050 - The ceramic industry roadmap. Cerame-Unie - The european ceramic industry association, Brussels, Belgium.
- Chau, C.K., Leung, T.M., Ng, W.Y., 2015. A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. *Appl. Energy* 143,

- 395–413. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.023>
- Chomkamsri, K., Pelletier, N., 2011. Analysis of existing environmental footprint methodologies for products and organizations: recommendations, rationale and alignment, Institute for Environment and Sustainability. Ispra, Italy.
- Comissão Europeia, 2015. Fechar o ciclo – plano de ação da UE para a economia circular. COM (2015) 614.
- Comissão Europeia, 2014. Oportunidades para ganhos de eficiência na utilização de recursos no setor da construção. COM (2014) 445 1–11.
- Comissão Europeia, 2013a. Recomendação da Comissão sobre a utilização de métodos comuns para a medição e comunicação do desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida de produtos e organizações.
- Comissão Europeia, 2013b. Comunicação da Comissão: Construir o Mercado Único dos Produtos Ecológicos - Facilitar uma melhor informação sobre o desempenho ambiental de produtos e organizações - COM 2013/196.
- Comissão Europeia, 2011a. Roteiro para uma Europa Eficiente na utilização de recursos. COM (2011)571.
- Comissão Europeia, 2011b. Regulamento (UE) nº 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece condições harmonizadas para a comercialização dos produtos de construção e que revoga a Diretiva 89/106/CEE do Conselho. J. Of. da União Eur. L 88, 5–43.
- Comissão Europeia, 2010a. EUROPA 2020 - Estratégia para um crescimento inteligente, sustentável e inclusivo. COM (2010) 2020.
- Comissão Europeia, 2010b. Regulamento (CE) nº 66/2010 relativo a um sistema de rótulo ecológico da UE. J. Of. da União Eur. L 27, 1–19.
- Comissão Europeia, 2010c. Diretiva 2010/75/UE relativa às emissões industriais (prevenção e controlo integrados da poluição). J. Of. da União Eur. L 334, 103.
- Comissão Europeia, 2009a. DIRECTIVA 2009/125/CE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à criação de um quadro para definir os requisitos de concepção ecológica dos produtos relacionados com o consumo de energia. J. Of. da União Eur. L 285/10, 10–35.
- Comissão Europeia, 2009b. Critérios ecológicos para a atribuição do rótulo ecológico comunitário a revestimentos duros (decisão 2009/607/CE). J. Of. da União Eur. L 208, 18.
- Comissão Europeia, 2008. Contratos públicos para um ambiente melhor, COM (2008) 400 final. J. Of. da União Eur.
- Comissão Europeia, 2004. Comunicação da Comissão ao conselho e ao parlamento europeu - Política integrada de produtos Desenvolvimento de uma reflexão ambiental centrada no ciclo de vida. COM (2003)/302.
- Condeixa, K., Haddad, A., Boer, D., 2014. Life cycle impact assessment of masonry system

- as inner walls: A case study in Brazil. *Constr. Build. Mater.* 70, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.113>
- Confindustria Ceramica, 2016. Environmental product declaration for Italian ceramic tiles. Institut Bauen und Umwelt e.V.
- Consoli, F. (Ed.), 1993. Guidelines for life-cycle assessment: a “code of practice.” Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Pensacola, USA.
- Couto, D.R.A., 2011. Declaração Ambiental de Produtos de Construção – (Estudo de Caso) (Dissertação de mestrado). Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Curran, M.A., 2014. Strengths and limitations of life cycle assessment, in: Klöpffer, W. (Ed.), *Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment*. Springer, New York, USA, pp. 189–206. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8697-3>
- Curran, M.A. (Ed.), 2012. *Life cycle assessment handbook - A guide for environmentally sustainable products*. Wiley, Cincinnati, OH, USA. <https://doi.org/10.1002/9781118528372>
- Curran, M.A., Overly, J.G., Hofstetter, P., Muller, R., Lippiatt, B., 2002. BEES 2.0 - Building for environmental and economic sustainability. Peer review report. Washington, USA.
- Del Borghi, A., 2013. LCA and communication: Environmental Product Declaration. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 293–295. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0513-9>
- Del Borghi, A., Gaggero, P.L., Gallo, M., Strazza, C., 2008. Development of PCR for WWTP based on a case study. *Int. J. Life Cycle Assess.* 13, 512–521. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0023-y>
- Demertzi, M., 2016. Evaluation of the cork sector’s environmental performance through Life Cycle Assessment. (Doctoral thesis). Universidade de Aveiro, Aveiro.
- DGEG, 2017. Portal da Direção Geral de Energia e Geologia [WWW Document]. Dados Mens. Energ. Elétrica. URL <http://www.dgeg.gov.pt> (accessed 8.8.17).
- EC-JRC, 2012. Characterisation factors of the ILCD recommended life cycle impact assessment methods: database and supporting information, European Commission. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. <https://doi.org/10.2788/60825>
- EC-JRC, 2011. ILCD handbook - Recommendations for life cycle impact assessment in the European context - based on existing environmental impact assessment models and factors. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Itália. <https://doi.org/10.278/33030>
- EC-JRC, 2010a. ILCD handbook - Framework and requirements for life cycle impact assessment models and indicators, International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Itália. <https://doi.org/10.2788/38719>
- EC-JRC, 2010b. ILCD Handbook - General guide for life cycle assessment - Detailed Guidance. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, Ispra, Itália.

- Ecoinvent, 2014. Ecoinvent version 3 database - The life cycle inventory. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Bern, Switzerland.
- European Commission, 2017. PEFCR Guidance document - Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3.
- European Commission, 2014a. EU energy statistical pocketbook and country datasheets [WWW Document]. URL <https://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-statistical-pocketbook> (accessed 8.8.15).
- European Commission, 2014b. Portal da plataforma “European Platform on Life Cycle Assessment” [WWW Document]. URL <https://ec.europa.eu/jrc/en/scientific-tool/european-platform-on-life-cycle-assessment> (accessed 8.8.14).
- European Commission, 2012. Best Available Techniques (BAT) - Reference document for the manufacture of glass (BREF GLS). Institute for Prospective Technological Studies, Seville, Spain.
- European Commission, 2007. Reference document on Best Available Techniques in the ceramic manufacturing industry (BREF CER). Institute for prospective Technological Studies, Seville, Spain.
- Eurostat, 2017. Estatísticas anuais de produção por produto [WWW Document]. Prodcom Stat. by Prod. Annu. Data. URL <https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/data/excel-files-nace-rev.2> (accessed 10.5.17).
- Fazio, S., 2016. Review schemes and reviewers’ selection criteria in the Life Cycle Data Network framework, and at global level. Luxembourg. <https://doi.org/10.2788/573305>
- FBB, 2012. EPD for Clay roof tiles 1.
- Fernandes, M.I.A. de A., Serra, A.V., Dias, A.B., 2004. Impactes ambientais e comércio de emissões - indústria cerâmica: um caso de estudo. Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, APICER - Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica, Coimbra, Portugal.
- Ferrão, P.C., 2009. Ecologia industrial: Princípios e ferramentas. IST Press, Lisboa, Portugal.
- Ferrão, P.C., 1998. Introdução à gestão ambiental: A avaliação de ciclo de vida de produtos. IST Press, Lisboa, Portugal.
- Ferreira, S., 2009. O pensamento do ciclo de vida como suporte à gestão dos resíduos sólidos da construção e demolição: exemplo no distrito federal e estudos de casos de sucessos no Brasil e no exterior. (Dissertação de Mestrado). Universidade de Brasília, Brasil.
- Finkbeiner, M., Schau, E.M., Lehmann, A., Traverso, M., 2010. Towards life cycle sustainability assessment. Sustainability 2, 3309–3322. <https://doi.org/10.3390/su2103309>
- Frej, A., Gottfried, D., 2005. Green office buildings: A practical guide to development. Urban Land Institute, Washington D.C., USA.

- Frischknecht, R., Joliet, O. (Eds.), 2016. Global guidance for life cycle impact assessment indicators. Volume 1, UNEP/SETAC Life Cycle Initiative,. United Nations Environment programme. <https://doi.org/10.1093/hmg/ddr117>
- Fullana-i-Palmer, P., 2011. Life cycle assessment of ceramic tiles., in: European Parliament Ceramics Forum Debate. Brussels, Belgium.
- Geng, A., Zhang, H., Yang, H., 2017. Greenhouse gas reduction and cost efficiency of using wood flooring as an alternative to ceramic tile: A case study in China. *J. Clean. Prod.* 166, 438–448. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.058>
- Geng, S., Wang, Y., Zuo, J., Zhou, Z., Du, H., Mao, G., 2017. Building life cycle assessment research : A review by bibliometric analysis. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 76, 176–184. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.068>
- Gensch, C.-O., Liu, R., 2008. LCA comparison of roofing systems (clay tiles , concrete tiles and metal sheets) - Final report for Monier Group GmbH.
- Gervásio, H., 2010. Sustainable design an integral life cycle analysis of bridges. (Doctoral thesis). Universidade de Coimbra, Portugal.
- Gervásio, H., Silva, L., 2007. State-of-art on LCA, in: First Workshop COST ACTION C25: On Sustainability of Constructions. Lisboa, Portugal.
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M.A.J., Schryver, A., Struijs, J., Zelm, R. van, 2009. ReCiPe 2008, a life cycle impact assessment method which comprise harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I: characterisation.
- Gomes, J.M., Salgado, A.L.F., Hotza, D., 2012. Life cycle assessment of ceramic bricks. *Mater. Sci. Forum* 727–728, 815–820. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.815>
- Guinée, J., Gorée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A., 2001. Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards. Leiden, Netherlands.
- Guinée, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., Rydberg, T., 2011. Life cycle assessment: past, present, and future. *Environ. Sci. Technol.* 45, 90–96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Haddad, A.N., Sedrez, M. de M., Condeixa, K., Evangelista, A.C.J., ThomasBoer, D., 2013. Life cycle assessment: a comparison of ceramic brick inventories to subsidize the development of satabases in Brazil. *Appl. Mech. Mater.* 431, 370–377. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.431.370>
- Han, B., Wang, R., Yao, L., Liu, H., Wang, Z., 2015. Life cycle assessment of ceramic façade material and its comparative analysis with three other common façade materials. *J. Clean. Prod.* 99, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.032>
- Hansen, A.P., Seo, E., Kulay, L., 2010. Identificação de oportunidade de melhoria de desempenho ambiental em processo de produção de materiais cerâmicos via aplicação da técnica de avaliação de ciclo de vida (ACV). *Produção online* 10, 912–936.
- Hauschild, M.Z., Huijbregts, M.A.J. (Eds.), 2015. Life cycle impact assessment, Springer. Springer Netherlands, London, New York city. <https://doi.org/10.1007/BF02978760>

- Heijungs, R., Guinée, J., Huppes, G., Lankreijer, R., Udo de Haes, H., Wegener Sleeswijk, A., Ansems, A., Eggels, P., Duin, R. van, Goede, H., 1992. Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds. Leiden, Netherlands.
- Hischier, R., Althaus, H.-J., Bauer, C., Doka, G., Frischknecht, R. Jungbluth, N., Nemecek, T., Simons, A., Stucki, M., Sutter, J., Tuchschnid, M., 2010. Documentation of changes implemented in ecoinvent Data v2.1 and v2.2. Final report ecoinvent data v2.2 No. 16. Dübendorf, Swiss.
- Huijbregts, M.A.J., Rombouts, L.J.A., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hendriks, A.J., Van De Meent, D., Ragas, A.M.I., Reijnders, L., Struijs, J., 2006. Is cumulative fossil energy demand a useful indicator for the environmental performance of products? *Environ. Sci. Technol.* 40, 641–648. <https://doi.org/10.1021/es051689g>
- Huijbregts, M.A.J., Steinmann, Z.J.N., Elshout, P.M.F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., Zelm, R. van, 2017. ReCiPe2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Hunsager, E.A., Bach, M., Breuer, L., 2014. An institutional analysis of EPD programs and a global PCR registry. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 786–795. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0711-8>
- Ibáñez-Forés, V., Bovea, M.-D., Simó, A., 2011. Life cycle assessment of ceramic tiles. Environmental and statistical analysis. *Int. J. Life Cycle Assess.* 16, 916–928. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0322-6>
- Ibáñez-Forés, V., Bovea, M.D., Azapagic, A., 2013. Assessing the sustainability of Best Available Techniques (BAT): methodology and application in the ceramic tiles industry. *J. Clean. Prod.* 51, 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.020>
- IEA, 2016. Portal do International Energy Agency [WWW Document]. Statistics (Ber). URL <https://www.iea.org/> (accessed 8.15.16).
- IFBQ, 2016. Selo ecológico Falcão Bauer [WWW Document]. Inst. Falcão Bauer. URL <http://www.ifbauer.org.br/sustentabilidade/selo-ecologico-falcao-bauer-1> (accessed 8.8.16).
- Industrieverband Keramische, 2011. Environmental product declaration of German ceramic Tiles. Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin, Germany.
- INE, 2017. Sistema de contas integradas das empresas - Portal do Instituto Nacional de Estatística [WWW Document]. Inst. Nac. Estatística. URL <https://www.ine.pt> (accessed 8.8.17).
- Ingwersen, W., Subramania, V. (editors), 2013. Guidance for Product Category Rule Development. Version 1.0.
- Ingwersen, W.W., Stevenson, M.J., 2012. Can we compare the environmental performance of this product to that one? An update on the development of product category rules and future challenges toward alignment. *J. Clean. Prod.* 24, 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.040>



- INIES, 2016. Portal do INIES [WWW Document]. Les données environnementales Sanit. référence pour le bâtiment. URL <http://www.inies.fr> (accessed 8.8.14).
- IPCC, 2016. Portal do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [WWW Document]. URL <http://www.ipcc.ch/> (accessed 8.8.16).
- IPQ, 2016. NP EN 771-1:2011+A1 2016 - Especificações para unidades de alvenaria - Parte 1: Unidades cerâmicas (tijolos cerâmicos). Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- IPQ, 2015. NP EN 1304:2015 - Telhas cerâmicas e acessórios. Definições e especificações dos produtos. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal.
- IPQ, 2005. NP EN ISO/IEC 17025:2005 - Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração. Instituto Português da Qualidade, Portugal.
- Islam, H., Jollands, M., Setunge, S., Bhuiyan, M.A., 2015a. Optimization approach of balancing life cycle cost and environmental impacts on residential building design. *Energy Build.* 87, 282–292. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.048>
- Islam, H., Jollands, M., Setunge, S., Haque, N., Bhuiyan, M.A., 2015b. Life cycle assessment and life cycle cost implications for roofing and floor designs in residential buildings. *Energy Build.* 104, 250–263. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.017>
- ISO, 2018. ISO 13006:2018 - Ceramic tiles - Definitions, classification, characteristics and marking. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2017. ISO 14026:2017 - Environmental labels and declarations - Principles, requirements and guidelines for communication of footprint information.
- ISO, 2016. ISO 14021:2016 - Environmental labels and declarations - Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling). International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2014a. ISO/TS 14071:2014 - Environmental management — Life cycle assessment — Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006.
- ISO, 2014b. ISO/TS 14072:2014 - Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment.
- ISO, 2012a. ISO/TR 14047:2012 - Environmental management - Life cycle assessment -- Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations.
- ISO, 2012b. ISO/TR 14049:2012 - Environmental management - Life cycle assessment -- Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis.
- ISO, 2006a. ISO 14040:2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. Geneva, Switzerland.
- ISO, 2006b. ISO 14044:2006. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. Geneva, Switzerland.
- ISO, 2006c. ISO 14025:2006 - Environmental labels and declarations - Type III

- environmental declarations - Principles and procedures.
- ISO, 2002. ISO/TS 14048:2002 Environmental management - Life cycle assessment - Data documentation format.
- ISO, 2000. ISO 14020:2000 - Environmental labels and declarations - General principles. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO, 1999. ISO 14024:1999 - Environmental labels and declarations - Type I environmental labelling - Principles and procedures. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Kellenberger, D., Althaus, H.-J., Jungbluth, N., Künniger, T., 2007. Life cycle inventories of building products. Final report ecoinvent data v2.0 No. 7. Dübendorf, Swiss.
- Koroneos, C., Dompros, A., 2007. Environmental assessment of brick production in Greece. *Build. Environ.* 42, 2114–2123. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.006>
- Kotaji, S., Schuurmans, A., Edwards, S., 2003. Life-cycle assessment in building and construction - a state-of-the-art report. ISBN 1-880611-59-7. SETAC Press, Pensacola, USA.
- Kuhtz, S., Zhou, C., Albino, V., Yazan, D.M., 2010. Energy use in two Italian and Chinese tile manufacturers : A comparison using an enterprise input – output model. *Energy* 35, 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.002>
- Kumbhar, S., Kulkarni, N., Rao, A.B., Rao, B., 2014. Environmental life cycle assessment of traditional bricks in Western Maharashtra, India. *Energy Procedia* 54, 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.269>
- Kuruppuarachchi, K., Ihalawatta, R., Kulatunga, A., 2014. Life Cycle Assessment of two different Clay Roofing Tiles. Peradeniya, Sri Lanka.
- Lasvaux, S., Achim, F., Garat, P., Peuportier, B., Chevalier, J., Habert, G., 2016. Correlations in life cycle impact assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters? *Ecol. Indic.* 67, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.01.056>
- Lasvaux, S., Habert, G., Peuportier, B., Chevalier, J., 2015. Comparison of generic and product-specific Life Cycle Assessment databases: application to construction materials used in building LCA studies. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0938-z>
- Lavat, A.E., Trezza, M.A., Poggi, M., 2009. Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture. *Waste Manag.* 29, 1666–1674. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.019>
- Leiden University, 2012. CML-IA - Characterisation factors [WWW Document]. URL <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors> (accessed 8.1.13).
- Li, X., Wang, Z., Nie, Z., 2008. Life cycle assessment of chinese typical ceramic tile. Beijing University of Technology, China.

- Manfredi, S., Allacker, K., Pelletier, N., Schau, E., Chomkamsri, K., Pant, R., Pennington, D., 2015. Comparing the European Commission product environmental footprint method with other environmental accounting methods. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 389–404. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0839-6>
- Mateus, R.F.M. da S., 2009. Avaliação da Sustentabilidade da Construção - Propostas para o Desenvolvimento de Edifícios mais Sustentáveis. (Tese de doutoramento). Universidade do Minho, Braga.
- Minkov, N., Schneider, L., Lehmann, A., Finkbeiner, M., 2015. Type III Environmental Declaration Programmes and harmonization of product category rules: status quo and practical challenges. *J. Clean. Prod.* 94, 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.012>
- Minne, E., Crittenden, J.C., 2015. Impact of maintenance on life cycle impact and cost assessment for residential flooring options. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 36–45. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0809-z>
- Misiga, P., 2012. Sustainability of construction products in the context of the emerging european resource efficiency policy, in: Stakeholder Workshop Measuring Sustainability in Construction: Building Coherent Tools with Product Category Rules (PCRs). TBE, Bruxelas, Bélgica.
- Modahl, I.S., Askham, C., Lyng, K.A., Skjerve-Nielssen, C., Nereng, G., 2013. Comparison of two versions of an EPD, using generic and specific data for the foreground system, and some methodological implications. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 241–251. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0449-0>
- Monteiro, H., Freire, F., 2012. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls : Comparison of three impact assessment methods. *Energy Build.* 47, 572–583. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.032>
- Nicoletti, G.M., Notarnicola, B., Tassielli, G., 2002. Comparative Life Cycle Assessment of flooring materials: Ceramic versus marble tiles. *J. Clean. Prod.* 10, 283–296. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00028-2)
- Oliveira, A., 2018. Exportações de produtos cerâmicos alcançaram novo máximo histórico em 2017. *Kéramica* 350, 34–35.
- Ortiz, O., Castells, F., Sonnemann, G., 2009. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Constr. Build. Mater.* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- Passer, A., Lasvaux, S., Allacker, K., De Lathauwer, D., Spirinckx, C., Wittstock, B., Kellenberger, D., Gschösser, F., Wall, J., Wallbaum, H., 2015. Environmental product declarations entering the building sector: critical reflections based on 5 to 10 years experience in different European countries. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 1199–1212. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0926-3>
- Pinheiro, M.D., 2006. Ambiente e Construção Sustentável. Instituto do Ambiente, Amadora, Portugal.

- Pini, M., Ferrari, A.M., Gamberini, R., Neri, P., Rimini, B., 2014. Life cycle assessment of a large, thin ceramic tile with advantageous technological properties. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 1567–1580. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0764-8>
- PWC, 2016. Capacitação da indústria da cerâmica portuguesa - Um cluster , uma estratégia , mercados prioritários.
- Quinteiro, P., Almeida, M., Dias, A.C., Araújo, A., Arroja, L., 2014. The carbon footprint of ceramic products, in: Muthu, S.S. (Ed.), *Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors*, Volume 1. Spring publications, pp. 113–150. <https://doi.org/10.1007/978-981-4560-41-2>
- Rademaekers, K.A., Asaad, S.S.Z., Berrg, J., 2011. Study on the competitiveness of the european companies and resource efficiency. Ecorys, Rotterdam, Netherlands.
- Ronning, A., Lyng, K., 2011. State of the art study - How is environmental performance measured for buildings/constructions?, in: Finkbeiner, M. (Ed.), *Towards Life Cycle Sustainability Management*. Springer, Dordrecht, pp. 141–154. <https://doi.org/10.1007/978-94-007->
- Ros-Dosdá, T., Celades, I., Monfort, E., Fullana-i-Palmer, P., 2018. Environmental profile of Spanish porcelain stoneware tiles. *Int. J. Life Cycle Assess.* 23, 1562–1580. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1377-9>
- Ros-Dosdá, T., Celades, I., Monfort, E., Moliner, R., Zaera, V., Benveniste, G., Cerdán, C., Fullana-i-Palmer, P., 2010. Impactos ambientales del ciclo de vida de las baldosas cerámicas . Análisis sectorial , identificación de estrategias de mejora y comunicación, in: *CONAMA 10 - Congreso Nacional Del Medio Ambiente*. Madrid, Espanha.
- Rouwette, R., 2010. LCA of Brick Products - Life Cycle Assessment Report (final report after critical review). Think Brick Australia, Austrália.
- Ruschi, M.S.M., Silva, M.G., Gomes, V., Franco, H.G., Schwambach, D., Lavor, B., 2014. Material eco-efficiency indicators for brazilian buildings. *Smart Sustain. Built Environ.* 3, 54–71. <https://doi.org/10.1108/SASBE-04-2013-0024>
- Santos, C.G., 2012. Declaraciones Ambientales de Producto: instrumento para la mejora de productos (Tese de doutoramento). Universitat Autònoma de Barcelona.
- Schaltegger, S., Braunschweig, A., Büchel, K., Dinkel, F., Frischknecht, R., Maillefer, C., Ménard, M., Peter, D., Pohl, C., Ros, M., Sturm, A., Waldeck, B., Zimmermann, P. (Eds.), 1996. *Life Cycle Assessment (LCA) — Quo vadis?* Birkhauser, Basel; Boston; Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-9022-9>
- SECIL, 2017. Portal da Secil Argamassas [WWW Document]. Argamassa de alvenaria. URL [www.secilargamassas.pt](http://www.secilargamassas.pt) (accessed 8.9.17).
- SECIL, 2012. Portal da Secil Argamassas [WWW Document]. Argamassa de alvenaria. URL [www.secilargamassas.pt](http://www.secilargamassas.pt) (accessed 4.28.12).
- Serrano, A., Dias, B., Cunha, F., Trindade, L., Santos, J., 2009. Manual de Boas práticas na Utilização Racional de Energia e Energias Renováveis. Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica (APICER).

- Silvestre, J.D., 2012. Life cycle assessment “from cradle to cradle” of building assemblies - application to external walls. (Tese de doutoramento). Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Silvestre, J.D., Brito, J. de, Pinheiro, M.D., 2010. Certificação ambiental de materiais e soluções construtivas aplicação à realidade portuguesa, in: Ferreira, V., Dias, B., Brito, J. de, Bragança, L. (Eds.), *Inovação Na Construção Sustentável (CINCOS '10)*. Plataforma para a Construção Sustentável, Curia, Portugal, pp. 97–111.
- Silvestre, J.D., Brito, J. De, Pinheiro, M.D., 2013. From the new European Standards to an environmental , energy and economic assessment of building assemblies from cradle-to-cradle. *Energy Build.* 64, 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.001>
- Silvestre, J.D., Brito, J. De, Pinheiro, M.D., 2006. Building’s external walls in Life-Cycle Assessment (LCA) research studies, in: *Conferência Internacional Portugal SB10: Sustainable Building Affordable to All*. iiSBE, Universidade do Minho, Instituto Superior Técnico, Vilamoura, Portugal, pp. 629–638. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1412.7129>
- Silvestre, J.D., Lasvaux, S., Hodková, J., de Brito, J., Pinheiro, M.D., 2015. NativeLCA - a systematic approach for the selection of environmental datasets as generic data: application to construction products in a national context. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 731–750. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0885-8>
- Souza, D., Lafontaine, M., Charron-doucet, F., Chappert, B., Kicak, K., Duarte, F., Lima, L., 2016. Comparative life cycle assessment of ceramic brick , concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. *J. Clean. Prod.* 137, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.069>
- Souza, D.M. de, Lafontaine, M., Charron-doucet, F., Bengoa, X., Chappert, B., Duarte, F., Lima, L., 2015. Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context. *J. Clean. Prod.* 89, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.029>
- Spirinckx, C., Peeters, K., Debacker, W., Vandeveld, B., Theo, G., Durand, A., Götz, T., Lemeire, C., Lust, A., 2014. Exploratory study with regard to Ecodesign of thermal insulation in buildings ( Lot 36 ): MEeP tasks 0 , 1 and 7 ( partly ). VITO, Belgium.
- Subramanian, V., Ingwersen, W., Hensler, C., Collie, H., 2012. Comparing product category rules from different programs: Learned outcomes towards global alignment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 892–903. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0419-6>
- Sundstrom, G., 1971. Investigation of energy requirements from raw material to garbage treatment for four Swedish beer and packaging alternatives. Rigello Pak AB. Malmo, Sweden. Sweden.
- TBE, 2017. Portal da Tiles & Bricks Europe (TBE) [WWW Document]. URL <http://www.tiles-bricks.eu/industry/> (accessed 8.8.17).
- TCNA, 2014. Environmental Product Declaration for Ceramic tile.
- Tibor, T., Feldman, I., 1996. ISO 14000: Um Guia para as Novas Normas de Gestão

- Ambiental. Futura. Futura, São Paulo, Brasil.
- Tikul, N., 2014. Applied Environmental Research Environmental and Economic of Flooring Building Materials. Appl. Environ. Res. 36, 47–59.
- Tikul, N., Srichandr, P., 2010. Assessing the environmental impact of ceramic tile production in Thailand. J. Ceram. Soc. Japan 118, 887–894. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.118.887>
- Torgal, F.P., Jalali, S., 2010. A Sustentabilidade dos materiais de construção, TecMinho. ed. TecMinho, Guimarães.
- Vale, C., Mateus, R.F.M. da S., Bragança, L., 2010. Avaliação de Impactes Ambientais de Ciclo de Vida de um Edifício de Habitação Unifamiliar, in: Congresso de Inovação Na Construção Sustentável - CINCOS '10. Plataforma para Construção Sustentável, Curia, Portugal.
- Vieira, M., 2016. Contributo para a avaliação do desempenho ambiental de telha cerâmica através da aplicação da Pegada Ambiental do Produto (Dissertação de mestrado). Tese Mestr. - IPL.
- WEBER, 2016. Portal da Saint Gobain Weber [WWW Document]. Fichas técnicas. URL [www.weber.com.pt](http://www.weber.com.pt) (accessed 8.8.15).
- Zackrisson, M., Rocha, C., Christiansen, K., Jarnehammar, A., 2008. Stepwise environmental product declarations: ten SME case studies. J. Clean. Prod. 16, 1872–1886. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.01.001>

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## Anexos



Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## **Anexo A.1 - Lista de publicações completa decorrente dos trabalhos desenvolvidos na tese**

- Almeida, M.I., Dias, A.C., Dias, B., Arroja, L., 2010. Life cycle assessment (cradle to gate) of a Portuguese brick, in: Conferência Internacional Portugal SB10: Sustainable Building Affordable to All. iiSBE, Universidade do Minho, Instituto Superior Técnico, Vilamoura, Portugal, pp. 477–482.
- Almeida, M.I.A., Dias, A.C., Dias, B., Castanheira, E., Arroja, L., 2010a. Avaliação de impactes no fabrico de pavimento e revestimento cerâmico, in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS'10. Plataforma para Construção Sustentável, Anadia, Portugal, pp. 399–411.
- Almeida, M.I.A., Dias, A.C., Dias, B., Castanheira, E., Arroja, L., 2010b. Declaração ambiental de produto aplicado ao tijolo, in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS'10. Plataforma para Construção Sustentável, Curia, Portugal, pp. 125–133.
- Almeida, M.I., 2011. Rótulos e declarações ambientais. *Kéramica* 308, 6–12.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2011a. Declaração ambiental de produto para cerâmicos de alvenaria, in: Lourenço, P., Vasconcelos, G., Mendonça, P., Camões, A., Mateus, R., Bragança, L., Ramos, L. (Eds.), *Paredes Divisórias: Passado, Presente e Futuro*. Escola de engenharia da Universidade do Minho, Porto, Portugal, pp. 55–66.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2011b. Environmental product declaration in Portuguese ceramic tile, in: Bartolo et al (Ed.), *International Conference on Sustainable Intelligent Manufacturing*. IPL Leiria, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Castanheira, É.G., Arroja, L., 2011c. Environmental product declaration in ceramic materials as sustainability tool, in: *LCM 2011 - Towards Life Cycle Sustainability Management*. Berlin, Germany.
- Almeida, M.I., 2012. Declarações ambientais de produto e regras categoria produto. Plataforma para a Construção Sustentável, Universidade de Aveiro, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2012a. Declarações ambientais de produto para materiais de cobertura, in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS'12. Plataforma para a Construção Sustentável, Aveiro, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2012b. Desempenho ambiental de paredes de alvenaria em tijolo, in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS'12. Plataforma para a Construção Sustentável, Aveiro, Portugal, pp. 225–234.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2012c. Avaliação do ciclo de vida de revestimentos de cerâmica, in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS' 12. Plataforma para a Construção Sustentável, Aveiro, Portugal.
- Almeida, M.I., Santos, M.I., Francisco, V., 2012d. Perceção do mercado para materiais para a construção sustentável, in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável -

- CINCOS'12. Plataforma para a Construção Sustentável, Aveiro, Portugal, pp. 913–926.
- Ferreira, V., Almeida, M.I., Dias, B., 2012. DAPHabitat – o sistema nacional de registo de declarações ambientais de produtos para o habitat, in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS '12. Plataforma para a Construção Sustentável, Aveiro, Portugal, p. 721-727.
- Demertzi, M., Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2013. Avaliação de ciclo de vida de revestimento cerâmico através de declarações ambientais de produto, in: 10ª Conferência Nacional Do Ambiente XII Congresso Nacional de Engenharia Do Ambiente. Aveiro, Portugal.
- Almeida, M.I., 2013. Developing the EPDs for the portuguese ceramic industry and the Portuguese EPDs registration System, in: Conferência Internacional Portugal SB13. iiSBE, Universidade do Minho, Instituto Superior Técnico, Guimarães, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A., Arroja, L., 2013a. Environmental product declaration for ceramic tile, in: Energy for Sustainability 2013 Conference (Efs 2013). Coimbra, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2013b. Avaliação de ciclo de vida de ladrilhos cerâmicos, in: 10ª Conferência Nacional Do Ambiente XII Congresso Nacional de Engenharia Do Ambiente. Aveiro, Portugal.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., Demertzi, M., 2013c. A declaração ambiental de produtos de cerâmicos de alvenaria, como ferramenta de ecomarketing, in: 10ª Conferência Nacional Do Ambiente XII Congresso Nacional de Engenharia Do Ambiente. Aveiro, Portugal.
- Almeida, M.I., 2014. Como elaborar uma declaração ambiental de produto com base em avaliação de ciclo de vida, in: Workshop Sobre Sustentabilidade na Construção. Albergaria à Velha, Portugal.
- Quinteiro, P., Almeida, M., Dias, A.C., Araújo, A., Arroja, L., 2014. The carbon footprint of ceramic products, in: Muthu, S.S. (Ed.), Assessment of Carbon Footprint in Different Industrial Sectors, Volume 1. Spring publications, pp. 113–150. <https://doi.org/10.1007/978-981-4560-41-2>
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2014a. Declaração ambiental de produto - Caso de estudo de fundamentação de impactes na telha cerâmica, in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS' 14. Plataforma para a Construção Sustentável, Porto, Portugal, pp. 125–133.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2014b. Avaliação de ciclo de vida de ladrilho cerâmico e seu potencial de melhoria, in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS '14 Construção Sustentável - CINCOS '14. Plataforma para a Construção Sustentável, Porto, Portugal, pp. 399–411.
- Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2014c. Desempenho ambiental de paredes de alvenaria em tijolo. *Kéramica* 330, 6–12.
- Almeida, M.I., Dias, B., Lopes, K., Ferreira, V., 2014d. DAPHabitat – o sistema nacional de registo de declarações ambientais de produtos para o Habitat, in: Congresso de

Inovação na Construção Sustentável - CINCOS '14. Porto, Portugal.

Almeida, M.I., Barata, J., Dias, A.C., Arroja, L., 2015a. Environmental product declaration of ceramic roof tiles: a case study of information requirements within the life cycle, in: Energy for Sustainability 2015 Conference (EfS 2015). Coimbra, Portugal.

Almeida, M.I., Dias, A.C., Demertzi, M., Arroja, L., 2015b. Contribution to the development of product category rules for ceramic bricks. J. Clean. Prod. 92, 206–215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.073>

Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2016a. Environmental product declaration – New challenges , new impact categories . Case study applied to ceramic floor tiles ., in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS' 16. Plataforma para a Construção Sustentável, Lisboa, pp. 175–188.

Almeida, M.I., Dias, A.C., Demertzi, M., Arroja, L., 2016b. Environmental profile of ceramic tiles and their potential for improvement. J. Clean. Prod. 131, 583–593. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.131>

Almeida, M.I., Frade, P., Rodrigues, S., Machado, S., Simões, F., 2016c. Environmental performance in brickworks and assessing the cost / benefit of BAT, in: Congresso de Inovação na Construção Sustentável - CINCOS '16. Plataforma para a Construção Sustentável, Lisboa, Portugal, pp. 151–168.

Almeida, M.I., Dias, B., Francisco, V., Amado, A., Simões, F., 2017. Análise da viabilidade da aplicação de estratégias de economia circular na indústria cerâmica. Kérâmica 345, 8–13.

Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2018a. Avaliação de ciclo de vida de revestimento cerâmico: novas categorias de impacte e potencial de melhoria, in: CIALP – Conferência Internacional de Ambiente Em Língua Portuguesa XX Encontro REALP e XI CN. Aveiro, Portugal, pp. 1–10.

Almeida, M.I., Dias, A.C., Arroja, L., 2018b. Influência de variáveis da tecnologia de fabrico na determinação de impactes ambientais da telha cerâmica, in: CIALP – Conferência Internacional de Ambiente Em Língua Portuguesa XX Encontro REALP e XI CN. Aveiro, Portugal.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

## Anexo A.2 - Operadores de programa. Caso do DAPHabitat

Na Figura A. 1 são apresentados alguns programas internacionais de gestão, validação e registo de DAP's.

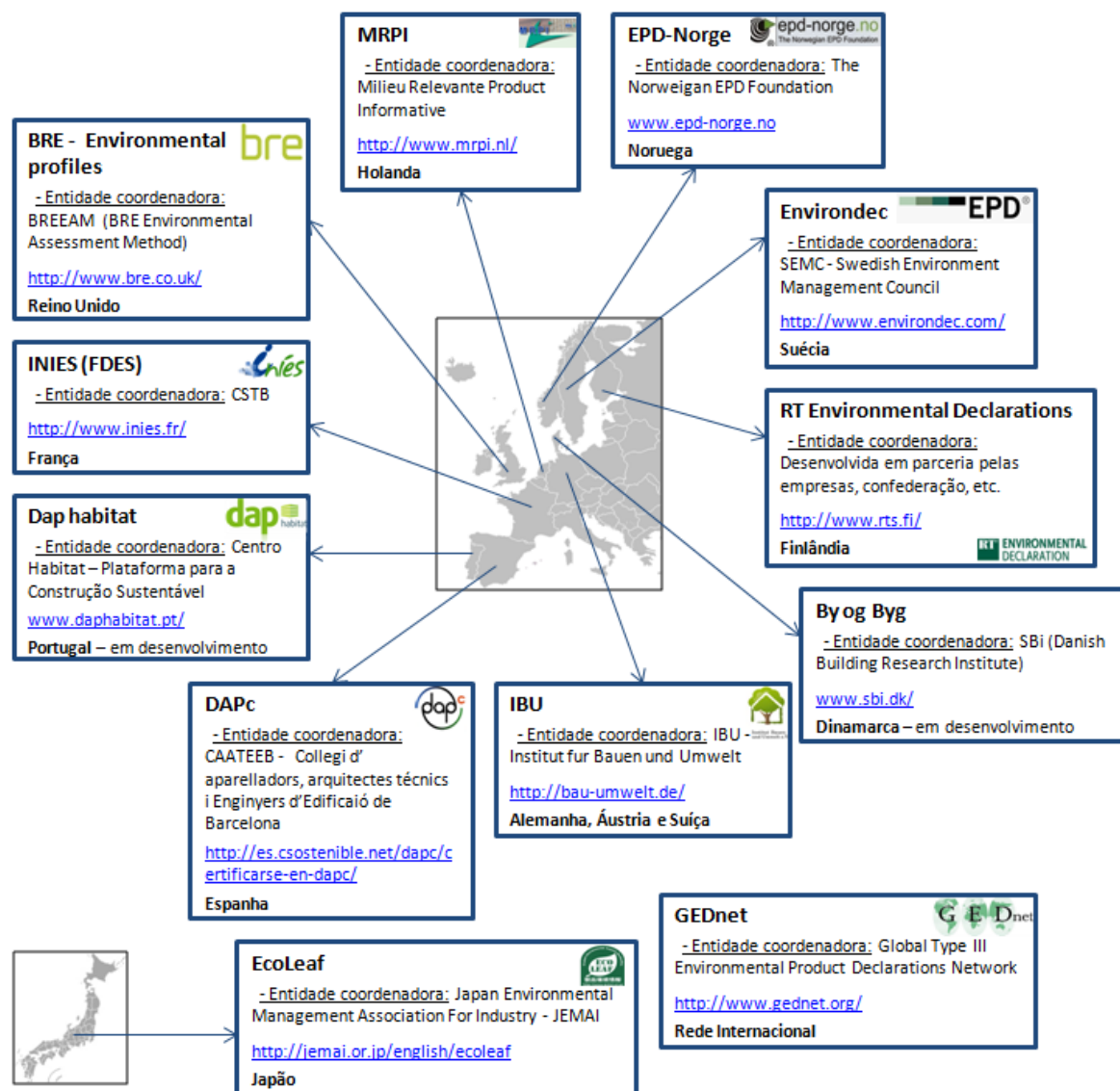


Figura A. 1 – Alguns exemplos de Programas de registo de DAP's (adaptado de Anderson et al., 2012)

Neste item dá-se destaque ao sistema DAPHabitat, operador de programa nacional, no qual houve uma participação ativa na sua conceção, desenvolvimento, e manutenção. Os objetivos principais do sistema DAPHabitat são:

- promover a elaboração e o registo de DAPs no âmbito da fileira do habitat;
- criar uma dinâmica de desenvolvimento da informação ambiental dos produtos;

- adaptar e/ou desenvolver RCP por categoria de produto, indispensáveis à construção das DAP.

Em termos de organização o sistema DAPHabitat é composto por uma série de elementos dos quais se destacam (Almeida et al., 2014c):

- **Operador de programa (OP)** – a gestão do Sistema DAPHabitat é garantida pela Plataforma para a Construção Sustentável.
- **Comissão técnica** - constituída atualmente por 12 especialistas em ACV e DAP de diversas instituições como o Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro (CTCV), a Universidade de Aveiro, Universidade do Minho, Universidade de Coimbra, Instituto Superior Técnico, Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) e a Agência Portuguesa do Ambiente (APA). A sua função envolve a elaboração, validação e aprovação de propostas de RCP, de aprovação dos RCP realizados por outras entidades e aprovar a adoção de RCP de outros sistemas afins, nomeadamente, no que se refere ao conteúdo técnico, científico e sua coerência. Constitui o painel de revisão de RCP, para além de auxiliar o OP em outras questões técnicas.
- **Forum RCP e fórum DAP** - promove a discussão dos RCP ou de aspetos específicos relacionados com o seu desenvolvimento.
- **Instruções Gerais do Sistema DAPHabitat** – documento que contem os requisitos e regras de funcionamento do Sistema DAPHabitat, faz o enquadramento e inclui a descrição do sistema de registo DAPHabitat, o processo de desenvolvimento das RCP e o processo de desenvolvimento de uma DAP
- **Verificação e verificadores** – executada por organismos certificadores independentes, reconhecidos pelo sistema DAPHabitat, de forma a garantir a independência do processo de verificação das DAP. Os verificadores são técnicos profissionais com as qualificações necessárias mínimas exigidas pelas normas aplicáveis e pelo organismo certificador para exercer a verificação das DAP.

De mencionar que desenvolver uma DAP no Sistema DAPHabitat requer o seguinte procedimento:

- Verificar as RCP disponíveis/ iniciar o desenvolvimento do documento RCP adequado;
- Efetuar a recolha dos dados e ACV a incluir numa DAP;
- Compilar a informação ambiental a incluir na DAP no formato disponibilizado pelo Sistema;
- Submeter a DAP ao procedimento de verificação;
- Registrar a DAP no Sistema;

- Regras de utilização do logótipo (ver site <http://www.daphabitat.pt>).

A integração internacional do DAPHabitat na ECOPlatform permite o reconhecimento mútuo da DAP além-fronteiras. A ECOPlatform é uma organização internacional que agrega uma série de operadores europeus de programas de registo de DAPs do sector da construção, com o objetivo de comunicar informação ambiental relevante dos seus produtos num formato harmonizado e reconhecido entre os países europeus, poupando recursos aos fabricantes e outras partes envolvidas.



Esta página foi intencionalmente deixada em branco

### Anexo A.3 – Impacte ambiental dos produtos cerâmicos em estudo

Tabela A. 1 – Impacte potencial associado a 1 m<sup>2</sup> de parede de tijolo cerâmico do berço ao túmulo

Categoria de impacte	Unidade	BIO	CP	BIO+CP	GN
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,60E+01	2,49E+01	2,14E+01	2,01E+01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	1,36E-05	4,38E-05	3,61E-05	1,33E-05
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	1,03E-02	9,85E-03	1,00E-02	8,60E-03
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	4,70E-03	9,73E-03	8,44E-03	3,87E-03
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	1,38E-06	1,61E-06	1,50E-06	2,25E-06
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	9,74E-07	8,45E-07	8,92E-07	8,07E-07
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	1,51E+02	2,63E+02	2,07E+02	2,29E+02
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	2,51E-08	1,92E-08	2,18E-08	1,91E-08
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	1,61E-06	1,31E-06	1,46E-06	1,29E-06
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	2,12E-02	2,28E-02	2,31E-02	1,46E-02
Uso do solo (LU)	kg C deficit	3,15E+01	1,23E+01	2,19E+01	1,21E+01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	1,18E-02	8,83E-03	1,05E-02	7,27E-03
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	1,86E+01	1,85E+01	1,84E+01	1,83E+01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	8,98E-02	2,58E-01	2,15E-01	8,57E-02
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	7,70E-02	8,59E-02	8,47E-02	7,17E-02

*Tabela A. 2 - Impacte potencial associado a 1 m<sup>2</sup> de parede de tijolo cerâmico do berço ao portão*

<b>Categoria de impacte</b>	<b>Unidade</b>	<b>BIO</b>	<b>CP</b>	<b>BIO+CP</b>	<b>GN</b>
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	4,15E+00	1,28E+01	9,41E+00	8,07E+00
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	2,80E-02	1,78E-01	1,40E-01	2,63E-02
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	4,25E-03	3,84E-03	4,01E-03	2,63E-03
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	2,98E-03	7,86E-03	6,61E-03	2,18E-03
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	3,84E-07	6,02E-07	4,96E-07	1,22E-06
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	4,33E-07	3,01E-07	3,58E-07	2,73E-07
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	4,93E+01	1,57E+02	1,04E+02	1,25E+02
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	1,37E-08	7,98E-09	1,05E-08	7,91E-09
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	5,26E-07	2,36E-07	3,82E-07	2,17E-07
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	9,66E-03	1,12E-02	1,16E-02	3,30E-03
Uso do solo (LU)	kg C deficit	2,57E+01	7,12E+00	1,64E+01	6,90E+00
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	1,05E-02	7,80E-03	9,49E-03	6,26E-03
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	3,69E+00	3,55E+00	3,49E+00	3,38E+00
Acidificação (A+)	molc H+ eq	3,62E-02	2,00E-01	1,58E-01	3,22E-02
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	3,23E-02	4,09E-02	3,97E-02	2,72E-02

Tabela A. 3 – *Impacte potencial associado a 1 kg de parede de tijolo cerâmico do berço ao túmulo*

<b>Categoria de impacte</b>	<b>Unidade</b>	<b>BIO</b>	<b>CP</b>	<b>BIO+CP</b>	<b>GN</b>
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	2,24E-01	3,48E-01	2,99E-01	2,80E-01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	9,75E-04	3,14E-03	2,59E-03	9,52E-04
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	1,43E-04	1,38E-04	1,40E-04	1,20E-04
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	6,56E-05	1,36E-04	1,18E-04	5,41E-05
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	1,93E-08	2,25E-08	2,09E-08	3,14E-08
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	1,36E-08	1,17E-08	1,25E-08	1,13E-08
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	2,11E+00	3,67E+00	2,90E+00	3,20E+00
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	3,50E-10	2,67E-10	3,04E-10	2,66E-10
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	2,25E-08	1,83E-08	2,04E-08	1,80E-08
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	2,96E-04	3,18E-04	3,23E-04	2,04E-04
Uso do solo (LU)	kg C deficit	4,40E-01	1,72E-01	3,06E-01	1,69E-01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	1,65E-04	1,23E-04	1,47E-04	1,02E-04
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	2,60E-01	2,58E-01	2,57E-01	2,56E-01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	1,25E-03	3,61E-03	3,01E-03	1,20E-03
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	1,08E-03	1,20E-03	1,18E-03	1,00E-03

*Tabela A. 4 – Impacte potencial associado a 1 kg de parede de tijolo cerâmico do berço ao portão*

<b>Categoria de impacte</b>	<b>Unidade</b>	<b>BIO</b>	<b>CP</b>	<b>BIO+CP</b>	<b>GN</b>
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	5,80E-02	1,79E-01	1,31E-01	1,13E-01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	3,91E-04	2,49E-03	1,95E-03	3,68E-04
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	5,93E-05	5,36E-05	5,60E-05	3,67E-05
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	4,16E-05	1,10E-04	9,23E-05	3,04E-05
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	5,36E-09	8,41E-09	6,92E-09	1,71E-08
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	6,05E-09	4,20E-09	5,00E-09	3,81E-09
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	6,88E-01	2,20E+00	1,45E+00	1,74E+00
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	1,91E-10	1,12E-10	1,47E-10	1,10E-10
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	7,35E-09	3,30E-09	5,34E-09	3,03E-09
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	1,35E-04	1,57E-04	1,61E-04	4,61E-05
Uso do solo (LU)	kg C deficit	3,59E-01	9,95E-02	2,29E-01	9,63E-02
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	1,47E-04	1,09E-04	1,33E-04	8,74E-05
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	5,16E-02	4,96E-02	4,87E-02	4,72E-02
Acidificação (A+)	molc H+ eq	5,06E-04	2,79E-03	2,21E-03	4,50E-04
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	4,51E-04	5,72E-04	5,55E-04	3,80E-04

Tabela A. 5 – Impacte potencial associado a 1 m<sup>2</sup> de telha cerâmica T1 do berço ao túmulo

Categoria de impacte	Unidade	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,35E+01	1,32E+01	1,36E+01	1,33E+01	1,21E+01	1,18E+01	1,17E+01	1,12E+01	1,14E+01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	6,46E-02	6,30E-02	6,24E-02	5,83E-02	4,74E-02	5,03E-02	4,94E-02	5,28E-02	5,32E-02
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	5,67E-03	5,63E-03	5,55E-03	4,83E-03	4,57E-03	4,67E-03	4,65E-03	4,61E-03	4,56E-03
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	2,78E-03	2,70E-03	2,80E-03	3,12E-03	2,58E-03	2,33E-03	2,11E-03	2,23E-03	2,23E-03
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	2,08E-06	2,06E-06	2,17E-06	2,11E-06	1,98E-06	1,97E-06	1,93E-06	1,90E-06	1,88E-06
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	4,43E-07	4,22E-07	4,08E-07	3,73E-07	3,61E-07	3,56E-07	3,54E-07	3,36E-07	3,38E-07
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	2,05E+02	2,02E+02	2,12E+02	2,07E+02	1,90E+02	1,90E+02	1,87E+02	1,81E+02	1,81E+02
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	1,71E-08	1,64E-08	1,62E-08	1,54E-08	1,44E-08	1,44E-08	1,40E-08	1,30E-08	1,33E-08
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	7,64E-07	7,53E-07	7,52E-07	7,37E-07	7,17E-07	7,18E-07	7,22E-07	7,09E-07	7,06E-07
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	1,73E-02	1,61E-02	1,62E-02	1,66E-02	1,44E-02	7,46E-03	7,24E-03	7,40E-03	7,10E-03
Uso do solo (LU)	kg C deficit	1,41E+01	1,32E+01	1,28E+01	1,11E+01	1,18E+01	1,14E+01	1,12E+01	1,13E+01	1,06E+01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	5,42E-03	5,56E-03	5,43E-03	5,23E-03	5,17E-03	6,02E-03	6,33E-03	5,91E-03	6,23E-03
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	1,40E+01	1,39E+01	1,39E+01	1,37E+01	1,36E+01	1,35E+01	1,35E+01	1,33E+01	1,33E+01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	7,81E-02	7,63E-02	7,55E-02	7,00E-02	5,77E-02	6,11E-02	6,00E-02	6,37E-02	6,40E-02
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	5,33E-02	5,29E-02	5,29E-02	4,79E-02	4,47E-02	4,53E-02	4,44E-02	4,41E-02	4,37E-02

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela A. 6 – Impacte potencial associado a 1 m<sup>2</sup> de telha cerâmica T2 do berço ao túmulo

Categoria de impacte	Unidade	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,69E+01	1,65E+01	1,67E+01	1,63E+01	1,64E+01	1,53E+01	1,58E+01	1,56E+01	1,58E+01	1,57E+01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	7,10E-02	6,62E-02	6,46E-02	5,60E-02	5,85E-02	4,99E-02	5,19E-02	5,31E-02	5,35E-02	5,04E-02
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	6,56E-03	6,36E-03	6,33E-03	5,72E-03	5,49E-03	5,22E-03	5,41E-03	5,37E-03	5,38E-03	5,49E-03
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	2,98E-03	2,84E-03	2,70E-03	2,41E-03	2,55E-03	2,22E-03	2,30E-03	2,39E-03	2,42E-03	2,09E-03
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	2,45E-06	2,40E-06	2,43E-06	2,39E-06	2,41E-06	2,38E-06	2,42E-06	2,46E-06	2,51E-06	2,48E-06
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	5,12E-07	5,07E-07	4,90E-07	4,64E-07	4,39E-07	4,33E-07	4,37E-07	4,39E-07	4,65E-07	4,22E-07
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	2,43E+02	2,40E+02	2,42E+02	2,37E+02	2,37E+02	2,29E+02	2,34E+02	2,41E+02	2,45E+02	2,42E+02
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	1,95E-08	1,95E-08	1,88E-08	1,79E-08	1,67E-08	1,61E-08	1,63E-08	1,63E-08	1,82E-08	1,67E-08
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	9,21E-07	9,08E-07	8,95E-07	8,82E-07	8,74E-07	8,51E-07	8,61E-07	8,75E-07	8,72E-07	8,53E-07
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	1,64E-02	1,57E-02	1,57E-02	1,53E-02	8,37E-03	7,87E-03	8,00E-03	8,07E-03	8,10E-03	7,42E-03
Uso do solo (LU)	kg C deficit	1,50E+01	1,48E+01	1,33E+01	1,24E+01	1,09E+01	1,07E+01	1,09E+01	1,11E+01	1,15E+01	9,19E+00
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	6,14E-03	6,25E-03	6,63E-03	6,39E-03	6,43E-03	8,55E-03	8,71E-03	9,56E-03	9,57E-03	9,38E-03
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	1,71E+01	1,67E+01	1,67E+01	1,65E+01	1,64E+01	1,63E+01	1,64E+01	1,64E+01	1,64E+01	1,61E+01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	8,61E-02	8,07E-02	7,88E-02	6,87E-02	7,10E-02	6,12E-02	6,37E-02	6,48E-02	6,53E-02	6,21E-02
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	6,07E-02	5,93E-02	5,82E-02	5,29E-02	5,18E-02	4,97E-02	5,11E-02	5,06E-02	5,14E-02	5,06E-02

Tabela A. 7 – Impacte potencial associado a 1 kg de telha cerâmica T1 do berço ao túmulo

Categoria de impacte	Unidade	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	3,30E-01	3,24E-01	3,34E-01	3,25E-01	2,96E-01	2,89E-01	2,87E-01	2,75E-01	2,79E-01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	1,58E-03	1,54E-03	1,53E-03	1,43E-03	1,16E-03	1,23E-03	1,21E-03	1,29E-03	1,30E-03
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	1,39E-04	1,38E-04	1,36E-04	1,18E-04	1,12E-04	1,14E-04	1,14E-04	1,13E-04	1,12E-04
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno e	6,81E-05	6,61E-05	6,87E-05	7,64E-05	6,31E-05	5,72E-05	5,17E-05	5,47E-05	5,47E-05
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	5,09E-08	5,05E-08	5,33E-08	5,16E-08	4,86E-08	4,83E-08	4,74E-08	4,65E-08	4,60E-08
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	1,09E-08	1,03E-08	1,00E-08	9,14E-09	8,85E-09	8,73E-09	8,67E-09	8,23E-09	8,29E-09
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	5,04E+00	4,95E+00	5,20E+00	5,08E+00	4,65E+00	4,65E+00	4,59E+00	4,43E+00	4,44E+00
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	4,19E-10	4,03E-10	3,98E-10	3,79E-10	3,53E-10	3,53E-10	3,44E-10	3,20E-10	3,25E-10
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	1,87E-08	1,84E-08	1,84E-08	1,81E-08	1,76E-08	1,76E-08	1,77E-08	1,74E-08	1,73E-08
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	4,23E-04	3,93E-04	3,96E-04	4,06E-04	3,53E-04	1,83E-04	1,77E-04	1,81E-04	1,74E-04
Uso do solo (LU)	kg C deficit	3,45E-01	3,24E-01	3,14E-01	2,72E-01	2,89E-01	2,80E-01	2,74E-01	2,77E-01	2,59E-01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	1,33E-04	1,36E-04	1,33E-04	1,28E-04	1,27E-04	1,48E-04	1,55E-04	1,45E-04	1,53E-04
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	3,42E-01	3,40E-01	3,40E-01	3,36E-01	3,32E-01	3,32E-01	3,31E-01	3,27E-01	3,26E-01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	1,91E-03	1,87E-03	1,85E-03	1,71E-03	1,42E-03	1,50E-03	1,47E-03	1,56E-03	1,57E-03
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	1,31E-03	1,30E-03	1,30E-03	1,17E-03	1,10E-03	1,11E-03	1,09E-03	1,08E-03	1,07E-03



## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela A. 8 – Impacte potencial associado a 1 kg de telha cerâmica T2 do berço ao túmulo

Categoria de impacte	Unidade	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	3,70E-01	3,63E-01	3,65E-01	3,57E-01	3,60E-01	3,36E-01	3,47E-01	3,43E-01	3,46E-01	3,44E-01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	1,56E-03	1,45E-03	1,42E-03	1,23E-03	1,28E-03	1,09E-03	1,14E-03	1,16E-03	1,17E-03	1,10E-03
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	1,44E-04	1,40E-04	1,39E-04	1,25E-04	1,20E-04	1,14E-04	1,19E-04	1,18E-04	1,18E-04	1,20E-04
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	6,53E-05	6,23E-05	5,93E-05	5,29E-05	5,60E-05	4,86E-05	5,03E-05	5,25E-05	5,30E-05	4,59E-05
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	5,38E-08	5,26E-08	5,34E-08	5,23E-08	5,28E-08	5,22E-08	5,30E-08	5,40E-08	5,51E-08	5,44E-08
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	1,12E-08	1,11E-08	1,07E-08	1,02E-08	9,63E-09	9,50E-09	9,59E-09	9,62E-09	1,02E-08	9,25E-09
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	5,33E+00	5,27E+00	5,30E+00	5,19E+00	5,20E+00	5,02E+00	5,14E+00	5,28E+00	5,37E+00	5,31E+00
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	4,27E-10	4,27E-10	4,11E-10	3,93E-10	3,67E-10	3,53E-10	3,57E-10	3,58E-10	4,00E-10	3,67E-10
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	2,02E-08	1,99E-08	1,96E-08	1,93E-08	1,92E-08	1,87E-08	1,89E-08	1,92E-08	1,91E-08	1,87E-08
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	3,45E-04	3,45E-04	3,45E-04	3,35E-04	1,84E-04	1,73E-04	1,75E-04	1,77E-04	1,78E-04	1,63E-04
Uso do solo (LU)	kg C deficit	3,59E-01	3,25E-01	2,92E-01	2,71E-01	2,39E-01	2,34E-01	2,38E-01	2,44E-01	2,51E-01	2,02E-01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	1,35E-04	1,37E-04	1,45E-04	1,40E-04	1,41E-04	1,87E-04	1,91E-04	2,10E-04	2,10E-04	2,06E-04
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	3,75E-01	3,67E-01	3,66E-01	3,62E-01	3,59E-01	3,58E-01	3,59E-01	3,59E-01	3,59E-01	3,54E-01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	1,89E-03	1,77E-03	1,73E-03	1,51E-03	1,56E-03	1,34E-03	1,40E-03	1,42E-03	1,43E-03	1,36E-03
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	1,33E-03	1,30E-03	1,28E-03	1,16E-03	1,14E-03	1,09E-03	1,12E-03	1,11E-03	1,13E-03	1,11E-03

Tabela A. 9 – Impacte potencial associado a 1 m<sup>2</sup> de telha cerâmica T1 do berço ao portão

Categoria de impacte	Unidade	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,08E+01	1,06E+01	1,10E+01	1,06E+01	9,48E+00	9,23E+00	9,13E+00	8,66E+00	8,80E+00
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	5,38E-02	5,22E-02	5,17E-02	4,77E-02	3,71E-02	4,00E-02	3,91E-02	4,24E-02	4,27E-02
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	3,79E-03	3,75E-03	3,67E-03	2,98E-03	2,72E-03	2,81E-03	2,80E-03	2,76E-03	2,71E-03
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	2,38E-03	2,30E-03	2,41E-03	2,71E-03	2,18E-03	1,95E-03	1,73E-03	1,85E-03	1,85E-03
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	1,60E-06	1,59E-06	1,69E-06	1,63E-06	1,51E-06	1,50E-06	1,46E-06	1,43E-06	1,41E-06
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	4,20E-07	3,99E-07	3,86E-07	3,52E-07	3,40E-07	3,36E-07	3,33E-07	3,16E-07	3,18E-07
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	1,65E+02	1,62E+02	1,72E+02	1,67E+02	1,50E+02	1,50E+02	1,48E+02	1,41E+02	1,42E+02
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	1,48E-08	1,42E-08	1,39E-08	1,32E-08	1,22E-08	1,22E-08	1,18E-08	1,09E-08	1,11E-08
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	2,85E-07	2,74E-07	2,73E-07	2,59E-07	2,39E-07	2,40E-07	2,43E-07	2,31E-07	2,29E-07
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	1,32E-02	1,20E-02	1,21E-02	1,25E-02	1,04E-02	3,69E-03	3,47E-03	3,63E-03	3,33E-03
Uso do solo (LU)	kg C deficit	1,35E+01	1,27E+01	1,23E+01	1,07E+01	1,13E+01	1,09E+01	1,07E+01	1,09E+01	1,01E+01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	4,88E-03	5,02E-03	4,89E-03	4,70E-03	4,64E-03	5,47E-03	5,77E-03	5,36E-03	5,67E-03
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	4,03E+00	3,96E+00	3,96E+00	3,79E+00	3,63E+00	3,63E+00	3,58E+00	3,42E+00	3,39E+00
Acidificação (A+)	molc H+ eq	6,38E-02	6,20E-02	6,13E-02	5,59E-02	4,40E-02	4,73E-02	4,62E-02	4,98E-02	5,01E-02
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	3,85E-02	3,81E-02	3,81E-02	3,33E-02	3,02E-02	3,07E-02	2,98E-02	2,96E-02	2,92E-02

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela A. 10 – Impacte potencial associado a 1 m<sup>2</sup> de telha cerâmica T2 do berço ao portão

Categoria de impacte	Unidade	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,39E+01	1,36E+01	1,37E+01	1,33E+01	1,34E+01	1,24E+01	1,29E+01	1,27E+01	1,28E+01	1,27E+01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	5,89E-02	5,43E-02	5,27E-02	4,45E-02	4,68E-02	3,85E-02	4,05E-02	4,16E-02	4,20E-02	3,90E-02
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	4,45E-03	4,26E-03	4,22E-03	3,64E-03	3,41E-03	3,15E-03	3,33E-03	3,30E-03	3,30E-03	3,41E-03
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	2,54E-03	2,40E-03	2,27E-03	1,99E-03	2,12E-03	1,80E-03	1,87E-03	1,97E-03	1,99E-03	1,68E-03
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	1,92E-06	1,87E-06	1,90E-06	1,85E-06	1,87E-06	1,84E-06	1,88E-06	1,92E-06	1,97E-06	1,94E-06
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	4,85E-07	4,81E-07	4,64E-07	4,39E-07	4,15E-07	4,09E-07	4,13E-07	4,15E-07	4,40E-07	3,98E-07
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	1,98E+02	1,95E+02	1,96E+02	1,91E+02	1,92E+02	1,84E+02	1,89E+02	1,95E+02	1,99E+02	1,97E+02
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	1,69E-08	1,69E-08	1,62E-08	1,54E-08	1,42E-08	1,36E-08	1,38E-08	1,38E-08	1,57E-08	1,42E-08
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	3,84E-07	3,71E-07	3,58E-07	3,45E-07	3,38E-07	3,16E-07	3,25E-07	3,38E-07	3,35E-07	3,17E-07
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	1,19E-02	1,13E-02	1,13E-02	1,09E-02	4,15E-03	3,67E-03	3,80E-03	3,87E-03	3,89E-03	3,23E-03
Uso do solo (LU)	kg C deficit	1,44E+01	1,43E+01	1,28E+01	1,19E+01	1,04E+01	1,02E+01	1,04E+01	1,06E+01	1,10E+01	8,78E+00
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	5,55E-03	5,65E-03	6,01E-03	5,78E-03	5,83E-03	7,88E-03	8,03E-03	8,86E-03	8,87E-03	8,69E-03
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	5,96E+00	5,59E+00	5,55E+00	5,39E+00	5,25E+00	5,19E+00	5,24E+00	5,25E+00	5,25E+00	5,02E+00
Acidificação (A+)	molc H+ eq	7,01E-02	6,49E-02	6,31E-02	5,32E-02	5,54E-02	4,60E-02	4,84E-02	4,94E-02	4,99E-02	4,68E-02
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	4,42E-02	4,28E-02	4,17E-02	3,66E-02	3,55E-02	3,35E-02	3,48E-02	3,44E-02	3,51E-02	3,43E-02

Tabela A. 11 – Impacte potencial associado a 1 kg de telha cerâmica T1 do berço ao portão

Categoria de impacte	Unidade	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	2,65E-01	2,59E-01	2,70E-01	2,61E-01	2,32E-01	2,26E-01	2,24E-01	2,12E-01	2,16E-01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	1,32E-03	1,28E-03	1,27E-03	1,17E-03	9,09E-04	9,79E-04	9,58E-04	1,04E-03	1,05E-03
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	9,29E-05	9,19E-05	8,99E-05	7,29E-05	6,68E-05	6,90E-05	6,87E-05	6,76E-05	6,65E-05
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	5,83E-05	5,64E-05	5,90E-05	6,64E-05	5,35E-05	4,77E-05	4,24E-05	4,53E-05	4,54E-05
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	3,93E-08	3,89E-08	4,15E-08	3,99E-08	3,70E-08	3,67E-08	3,58E-08	3,49E-08	3,45E-08
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	1,03E-08	9,79E-09	9,47E-09	8,63E-09	8,34E-09	8,23E-09	8,17E-09	7,74E-09	7,80E-09
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	4,05E+00	3,97E+00	4,21E+00	4,09E+00	3,67E+00	3,67E+00	3,62E+00	3,46E+00	3,47E+00
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	3,63E-10	3,47E-10	3,42E-10	3,23E-10	2,99E-10	2,98E-10	2,90E-10	2,66E-10	2,72E-10
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	6,98E-09	6,70E-09	6,70E-09	6,34E-09	5,86E-09	5,89E-09	5,97E-09	5,67E-09	5,61E-09
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	3,24E-04	2,95E-04	2,98E-04	3,07E-04	2,55E-04	9,05E-05	8,51E-05	8,90E-05	8,17E-05
Uso do solo (LU)	kg C deficit	3,31E-01	3,11E-01	3,01E-01	2,61E-01	2,77E-01	2,68E-01	2,63E-01	2,66E-01	2,48E-01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	1,20E-04	1,23E-04	1,20E-04	1,15E-04	1,14E-04	1,34E-04	1,41E-04	1,31E-04	1,39E-04
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	9,87E-02	9,69E-02	9,71E-02	9,28E-02	8,91E-02	8,89E-02	8,78E-02	8,39E-02	8,31E-02
Acidificação (A+)	molc H+ eq	1,56E-03	1,52E-03	1,50E-03	1,37E-03	1,08E-03	1,16E-03	1,13E-03	1,22E-03	1,23E-03
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	9,43E-04	9,34E-04	9,35E-04	8,16E-04	7,40E-04	7,54E-04	7,31E-04	7,25E-04	7,15E-04

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela A. 12 – Impacte potencial associado a 1 kg de telha cerâmica T2 do berço ao portão

Categoria de impacte	Unidade	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	3,05E-01	2,98E-01	3,00E-01	2,92E-01	2,95E-01	2,72E-01	2,83E-01	2,78E-01	2,81E-01	2,79E-01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	1,29E-03	1,19E-03	1,16E-03	9,75E-04	1,03E-03	8,44E-04	8,88E-04	9,11E-04	9,21E-04	8,54E-04
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	9,75E-05	9,34E-05	9,26E-05	7,97E-05	7,47E-05	6,90E-05	7,31E-05	7,23E-05	7,24E-05	7,49E-05
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	5,56E-05	5,27E-05	4,98E-05	4,36E-05	4,66E-05	3,94E-05	4,11E-05	4,32E-05	4,37E-05	3,68E-05
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	4,20E-08	4,09E-08	4,16E-08	4,06E-08	4,11E-08	4,05E-08	4,13E-08	4,22E-08	4,33E-08	4,26E-08
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	1,06E-08	1,05E-08	1,02E-08	9,63E-09	9,10E-09	8,97E-09	9,06E-09	9,09E-09	9,64E-09	8,73E-09
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	4,38E+00	4,28E00	4,31E+00	4,19E00	4,21E00	4,04E00	4,15E00	4,29E00	4,37E00	4,32E00
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	3,70E-10	3,70E-10	3,55E-10	3,38E-10	3,12E-10	2,99E-10	3,02E-10	3,03E-10	3,44E-10	3,12E-10
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	8,41E-09	8,14E-09	7,84E-09	7,57E-09	7,41E-09	6,92E-09	7,12E-09	7,42E-09	7,36E-09	6,95E-09
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	2,61E-04	2,48E-04	2,48E-04	2,38E-04	9,11E-05	8,05E-05	8,33E-05	8,48E-05	8,53E-05	7,08E-05
Uso do solo (LU)	kg C deficit	3,16E-01	3,13E-01	2,80E-01	2,60E-01	2,29E-01	2,24E-01	2,28E-01	2,33E-01	2,41E-01	1,92E-01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	1,22E-04	1,24E-04	1,32E-04	1,27E-04	1,28E-04	1,73E-04	1,76E-04	1,94E-04	1,94E-04	1,91E-04
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	1,31E-01	1,23E-01	1,22E-01	1,18E-01	1,15E-01	1,14E-01	1,15E-01	1,15E-01	1,15E-01	1,10E-01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	1,54E-03	1,42E-03	1,38E-03	1,17E-03	1,22E-03	1,01E-03	1,06E-03	1,08E-03	1,10E-03	1,03E-03
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	9,69E-04	9,38E-04	9,15E-04	8,02E-04	7,79E-04	7,34E-04	7,63E-04	7,54E-04	7,70E-04	7,53E-04

Tabela A. 13 – Impacte potencial associado a 1 m<sup>2</sup> de pavimento cerâmico do berço ao túmulo

Categoria de impacto	Unidade	PC1	PC2	PC3	PP4	PE5	BC6	BP7	BP8	BP9	VC10
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	2,17E+01	2,41E+01	2,21E+01	2,40E+01	2,56E+01	2,01E+01	2,04E+01	1,98E+01	1,86E+01	1,73E+01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	7,08E-02	8,73E-02	6,90E-02	7,61E-02	7,45E-02	5,85E-02	7,06E-02	5,89E-02	5,84E-02	5,09E-02
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	1,35E-02	1,55E-02	1,40E-02	1,47E-02	1,50E-02	1,25E-02	1,42E-02	1,32E-02	1,20E-02	1,21E-02
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	4,26E-03	5,21E-03	4,34E-03	4,82E-03	4,96E-03	3,84E-03	4,28E-03	4,04E-03	3,69E-03	3,61E-03
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	2,64E-06	3,19E-06	2,78E-06	2,71E-06	3,19E-06	2,52E-06	2,63E-06	2,28E-06	2,22E-06	2,22E-06
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	3,00E-06	3,64E-06	3,27E-06	2,24E-06	1,88E-06	2,20E-06	2,51E-06	2,20E-06	2,07E-06	2,21E-06
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	2,76E+02	3,16E+02	2,73E+02	3,12E+02	3,42E+02	2,53E+02	2,53E+02	2,45E+02	2,36E+02	2,16E+02
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	4,37E-08	5,55E-08	5,73E-08	6,63E-08	4,94E-08	6,06E-08	5,97E-08	6,61E-08	6,29E-08	5,83E-08
Toxicidade humana, efeito não- cancerígeno (HTnc)	CTUh	1,18E-06	1,83E-06	1,76E-06	1,88E-06	1,46E-06	1,79E-06	2,05E-06	1,71E-06	1,66E-06	1,68E-06
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	9,49E-03	1,15E-02	9,80E-03	1,16E-02	1,12E-02	8,24E-03	9,67E-03	8,37E-03	8,04E-03	6,72E-03
Uso do solo (LU)	kg C deficit	2,08E+02	2,11E+02	2,11E+02	2,12E+02	2,12E+02	2,10E+02	2,06E+02	2,09E+02	2,11E+02	2,12E+02
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	5,11E-02	5,41E-02	5,45E-02	7,23E-02	7,62E-02	5,58E-02	5,06E-02	6,72E-02	6,34E-02	4,94E-02
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	1,74E+01	1,96E+01	2,00E+01	1,40E+01	1,54E+01	1,76E+01	2,00E+01	1,49E+01	1,54E+01	1,50E+01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	8,84E-02	1,08E-01	8,69E-02	9,56E-02	9,41E-02	7,04E-02	8,92E-02	7,49E-02	7,27E-02	6,49E-02
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	6,72E-02	7,95E-02	7,06E-02	7,55E-02	9,08E-02	5,79E-02	7,12E-02	6,17E-02	5,26E-02	5,60E-02

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela A. 14 – Impacte potencial associado a 1 kg de pavimento cerâmico do berço ao túmulo

Categoria de impacto	Unidade	PC1	PC2	PC3	PP4	PE5	BC6	BP7	BP8	BP9	VC10
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,05E+00	1,04E+00	1,03E+00	1,06E+00	1,16E+00	1,09E+00	1,09E+00	1,13E+00	1,13E+00	1,03E+00
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	3,42E-03	3,76E-03	3,23E-03	3,38E-03	3,38E-03	3,16E-03	3,78E-03	3,35E-03	3,56E-03	3,03E-03
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	6,54E-04	6,68E-04	6,54E-04	6,52E-04	6,82E-04	6,77E-04	7,62E-04	7,50E-04	7,33E-04	7,19E-04
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	2,06E-04	2,25E-04	2,03E-04	2,14E-04	2,25E-04	2,08E-04	2,29E-04	2,29E-04	2,25E-04	2,15E-04
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	1,28E-07	1,37E-07	1,30E-07	1,20E-07	1,45E-07	1,36E-07	1,41E-07	1,30E-07	1,35E-07	1,32E-07
Depleção de recursos abióticos - elementos (ADe)	kg Sb eq	1,45E-07	1,57E-07	1,53E-07	9,95E-08	8,55E-08	1,19E-07	1,34E-07	1,25E-07	1,26E-07	1,31E-07
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	1,33E+01	1,36E+01	1,27E+01	1,39E+01	1,56E+01	1,37E+01	1,36E+01	1,39E+01	1,44E+01	1,29E+01
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	2,11E-09	2,39E-09	2,68E-09	2,94E-09	2,25E-09	3,28E-09	3,19E-09	3,75E-09	3,84E-09	3,47E-09
Toxicidade humana, efeito não- cancerígeno (HTnc)	CTUh	5,71E-08	7,90E-08	8,24E-08	8,36E-08	6,65E-08	9,65E-08	1,09E-07	9,71E-08	1,01E-07	1,00E-07
Matéria particulada	kg PM2.5 eq	4,58E-04	4,97E-04	4,58E-04	5,17E-04	5,08E-04	4,46E-04	5,17E-04	4,76E-04	4,90E-04	4,00E-04
Uso do solo (LU)	kg C deficit	1,00E+01	9,11E+00	9,88E+00	9,44E+00	9,64E+00	1,14E+01	1,10E+01	1,19E+01	1,28E+01	1,26E+01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	2,47E-03	2,33E-03	2,55E-03	3,21E-03	3,47E-03	3,01E-03	2,71E-03	3,82E-03	3,86E-03	2,94E-03
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	8,39E-01	8,46E-01	9,36E-01	6,21E-01	7,00E-01	9,52E-01	1,07E+00	8,45E-01	9,41E-01	8,91E-01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	4,27E-03	4,67E-03	4,06E-03	4,25E-03	4,28E-03	3,80E-03	4,77E-03	4,25E-03	4,43E-03	3,86E-03
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	3,25E-03	3,43E-03	3,30E-03	3,36E-03	4,13E-03	3,13E-03	3,81E-03	3,51E-03	3,21E-03	3,34E-03

Tabela A. 15 – Impacte potencial associado a 1 m<sup>2</sup> de pavimento cerâmico do berço ao portão

Categoria de impacte	Unidade	PC1	PC2	PC3	PP4	PE5	BC6	BP7	BP8	BP9	VC10
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,42E+01	1,52E+01	1,41E+01	1,57E+01	1,73E+01	1,25E+01	1,16E+01	1,23E+01	1,11E+01	1,00E+01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	4,99E-02	6,08E-02	4,60E-02	5,23E-02	5,10E-02	3,72E-02	4,51E-02	3,82E-02	3,75E-02	3,08E-02
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	4,58E-03	5,55E-03	4,63E-03	5,18E-03	5,55E-03	3,48E-03	4,42E-03	4,23E-03	3,06E-03	3,22E-03
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	2,34E-03	3,09E-03	2,35E-03	2,79E-03	2,94E-03	1,92E-03	2,20E-03	2,13E-03	1,78E-03	1,73E-03
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	1,91E-06	2,18E-06	1,93E-06	2,05E-06	2,31E-06	1,75E-06	1,65E-06	1,55E-06	1,48E-06	1,51E-06
Depleção de recursos abióticos - elementos (ADe)	kg Sb eq	1,89E-06	2,50E-06	2,15E-06	1,14E-06	7,98E-07	1,11E-06	1,40E-06	1,11E-06	9,85E-07	1,12E-06
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	2,08E+02	2,26E+02	1,96E+02	2,32E+02	2,63E+02	1,83E+02	1,66E+02	1,78E+02	1,68E+02	1,51E+02
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	2,15E-08	3,18E-08	3,43E-08	4,28E-08	2,65E-08	3,78E-08	3,59E-08	4,32E-08	4,01E-08	3,58E-08
Toxicidade humana, efeito não- cancerígeno (HTnc)	CTUh	4,72E-07	7,83E-07	9,00E-07	9,80E-07	5,90E-07	1,01E-06	1,00E-06	9,66E-07	9,08E-07	9,64E-07
Matéria particulada (PM)	kg PM2.5 eq	5,18E-03	6,27E-03	5,13E-03	6,75E-03	6,38E-03	3,99E-03	4,78E-03	4,25E-03	3,94E-03	2,76E-03
Uso do solo (LU)	kg C deficit	1,07E+01	1,42E+01	1,41E+01	1,51E+01	1,48E+01	1,28E+01	9,08E+00	1,18E+01	1,35E+01	1,44E+01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	1,16E-02	1,43E-02	1,48E-02	3,21E-02	3,59E-02	1,61E-02	1,09E-02	2,73E-02	2,35E-02	9,97E-03
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	7,48E+00	9,66E+00	1,01E+01	4,16E+00	5,55E+00	7,74E+00	1,00E+01	5,08E+00	5,63E+00	5,17E+00
Acidificação (A+)	molc H+ eq	6,00E-02	7,28E-02	5,58E-02	6,35E-02	6,24E-02	4,17E-02	5,48E-02	4,68E-02	4,45E-02	3,76E-02
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	4,16E-02	4,65E-02	4,20E-02	4,59E-02	6,11E-02	3,17E-02	3,91E-02	3,62E-02	2,71E-02	3,13E-02



## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela A. 16 – Impacte potencial associado a 1 kg de pavimento cerâmico do berço ao portão

Categoria de impacte	Unidade	PC1	PC2	PC3	PP4	PE5	BC6	BP7	BP8	BP9	VC10
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	6,88E-01	6,53E-01	6,57E-01	6,97E-01	7,88E-01	6,77E-01	6,23E-01	7,01E-01	6,76E-01	5,98E-01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	2,41E-03	2,62E-03	2,15E-03	2,33E-03	2,32E-03	2,01E-03	2,41E-03	2,17E-03	2,29E-03	1,83E-03
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	2,21E-04	2,39E-04	2,17E-04	2,30E-04	2,52E-04	1,88E-04	2,36E-04	2,40E-04	1,86E-04	1,92E-04
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	1,13E-04	1,33E-04	1,10E-04	1,24E-04	1,33E-04	1,04E-04	1,18E-04	1,21E-04	1,09E-04	1,03E-04
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	9,22E-08	9,38E-08	9,01E-08	9,12E-08	1,05E-07	9,48E-08	8,84E-08	8,78E-08	9,00E-08	8,98E-08
Depleção de recursos abióticos - elementos (ADe)	kg Sb eq	9,14E-08	1,08E-07	1,00E-07	5,08E-08	3,63E-08	5,99E-08	7,51E-08	6,32E-08	6,01E-08	6,66E-08
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P.C.I.	1,01E+01	9,73E+00	9,18E+00	1,03E+01	1,19E+01	9,89E+00	8,90E+00	1,01E+01	1,03E+01	9,01E+00
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	1,04E-09	1,37E-09	1,60E-09	1,90E-09	1,21E-09	2,04E-09	1,92E-09	2,46E-09	2,45E-09	2,13E-09
Toxicidade humana, efeito não- cancerígeno (HTnc)	CTUh	2,28E-08	3,37E-08	4,21E-08	4,36E-08	2,68E-08	5,43E-08	5,37E-08	5,49E-08	5,54E-08	5,74E-08
Matéria particulada (PM)	kg PM2.5 eq	2,50E-04	2,70E-04	2,40E-04	3,00E-04	2,90E-04	2,16E-04	2,56E-04	2,41E-04	2,40E-04	1,64E-04
Uso do solo (LU)	kg C deficit	5,15E-01	6,12E-01	6,60E-01	6,72E-01	6,71E-01	6,92E-01	4,85E-01	6,72E-01	8,25E-01	8,57E-01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	5,61E-04	6,16E-04	6,93E-04	1,43E-03	1,63E-03	8,73E-04	5,84E-04	1,55E-03	1,44E-03	5,93E-04
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	3,61E-01	4,16E-01	4,70E-01	1,85E-01	2,52E-01	4,18E-01	5,36E-01	2,89E-01	3,43E-01	3,08E-01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	2,90E-03	3,14E-03	2,61E-03	2,82E-03	2,84E-03	2,25E-03	2,93E-03	2,66E-03	2,71E-03	2,24E-03
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	2,01E-03	2,00E-03	1,96E-03	2,04E-03	2,78E-03	1,71E-03	2,09E-03	2,06E-03	1,65E-03	1,86E-03

Tabela A. 17 – Impacte potencial associado a 1 m<sup>2</sup> de revestimento cerâmico do berço ao túmulo

Categoria de impacte	Unidade	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,82E+01	1,68E+01	1,58E+01	1,86E+01	1,85E+01	1,77E+01	1,57E+01	1,28E+01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	5,59E-02	6,11E-02	4,82E-02	6,20E-02	6,20E-02	5,61E-02	5,56E-02	4,01E-02
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	8,98E-03	9,35E-03	8,79E-03	1,13E-02	1,11E-02	1,01E-02	9,29E-03	8,21E-03
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	3,12E-03	3,31E-03	2,93E-03	3,72E-03	3,66E-03	3,37E-03	3,12E-03	2,68E-03
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	2,29E-06	2,16E-06	2,16E-06	2,21E-06	2,25E-06	2,07E-06	1,83E-06	1,42E-06
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	3,28E-06	2,21E-06	1,78E-06	1,85E-06	1,85E-06	1,83E-06	1,69E-06	1,61E-06
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P. C. I.	2,31E+02	2,17E+02	2,12E+02	2,41E+02	2,45E+02	2,26E+02	2,02E+02	1,54E+02
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	7,41E-08	6,97E-08	4,79E-08	7,28E-08	7,06E-08	8,30E-08	6,24E-08	6,35E-08
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	1,66E-06	1,42E-06	1,47E-06	1,68E-06	1,61E-06	1,66E-06	1,40E-06	1,33E-06
Matéria particulada (PM2.5)	kg PM2.5 eq	9,58E-03	9,31E-03	8,14E-03	1,19E-02	1,46E-02	1,22E-02	8,45E-03	6,93E-03
Uso do solo (LU)	kg C deficit	2,14E+02	2,13E+02	2,10E+02	2,11E+02	2,15E+02	2,10E+02	2,14E+02	2,14E+02
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	5,17E-02	4,87E-02	4,71E-02	6,84E-02	6,69E-02	6,76E-02	6,19E-02	5,42E-02
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	2,32E+01	1,93E+01	2,03E+01	1,94E+01	2,11E+01	1,94E+01	1,83E+01	1,48E+01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	6,91E-02	7,39E-02	5,41E-02	7,93E-02	7,39E-02	7,08E-02	6,98E-02	3,44E-02
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	5,19E-02	5,85E-02	4,33E-02	6,73E-02	6,08E-02	6,17E-02	5,42E-02	3,30E-02

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela A. 18 – Impacte potencial associado a 1 kg de revestimento cerâmico do berço ao túmulo

Categoria de impacte	Unidade	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,09E+00	1,03E+00	9,45E-01	1,13E+00	1,15E+00	1,18E+00	1,14E+00	1,18E+00
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	3,33E-03	3,72E-03	2,89E-03	3,76E-03	3,85E-03	3,77E-03	4,03E-03	3,71E-03
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	5,35E-04	5,69E-04	5,27E-04	6,83E-04	6,90E-04	6,79E-04	6,73E-04	7,60E-04
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	1,86E-04	2,01E-04	1,76E-04	2,25E-04	2,28E-04	2,26E-04	2,26E-04	2,48E-04
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	1,36E-07	1,32E-07	1,29E-07	1,34E-07	1,40E-07	1,39E-07	1,33E-07	1,31E-07
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	1,96E-07	1,35E-07	1,07E-07	1,12E-07	1,15E-07	1,23E-07	1,22E-07	1,49E-07
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P. C. I.	1,38E+01	1,32E+01	1,27E+01	1,46E+01	1,52E+01	1,52E+01	1,46E+01	1,42E+01
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	4,41E-09	4,25E-09	2,87E-09	4,42E-09	4,38E-09	5,57E-09	4,52E-09	5,88E-09
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	9,91E-08	8,64E-08	8,80E-08	1,02E-07	9,99E-08	1,11E-07	1,02E-07	1,23E-07
Matéria particulada (PM)	kg PM2.5 eq	5,70E-04	5,67E-04	4,88E-04	7,23E-04	9,09E-04	8,22E-04	6,12E-04	6,41E-04
Uso do solo (LU)	kg C deficit	1,28E+01	1,30E+01	1,26E+01	1,28E+01	1,34E+01	1,41E+01	1,55E+01	1,98E+01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	3,08E-03	2,96E-03	2,82E-03	4,15E-03	4,15E-03	4,53E-03	4,49E-03	5,02E-03
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	1,38E+00	1,18E+00	1,22E+00	1,18E+00	1,31E+00	1,30E+00	1,33E+00	1,37E+00
Acidificação (A+)	molc H+ eq	4,11E-03	4,50E-03	3,24E-03	4,81E-03	4,59E-03	4,75E-03	5,05E-03	3,19E-03
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	3,09E-03	3,56E-03	2,59E-03	4,08E-03	3,77E-03	4,14E-03	3,93E-03	3,05E-03

Tabela A. 19 – Impacte potencial associado a 1 m<sup>2</sup> de revestimento cerâmico do berço ao portão

Categoria de impacte	Unidade	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,23E+01	1,10E+01	9,90E+00	1,27E+01	1,26E+01	1,20E+01	1,03E+01	7,80E+00
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	3,83E-02	4,35E-02	3,09E-02	4,45E-02	4,46E-02	3,96E-02	3,96E-02	2,61E-02
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	3,47E-03	3,86E-03	3,30E-03	5,73E-03	5,61E-03	4,77E-03	4,07E-03	3,32E-03
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	1,91E-03	2,10E-03	1,73E-03	2,49E-03	2,45E-03	2,19E-03	1,97E-03	1,60E-03
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	1,61E-06	1,50E-06	1,49E-06	1,55E-06	1,59E-06	1,45E-06	1,25E-06	9,28E-07
Depleção de recursos abióticos – elementos (ADe)	kg Sb eq	2,49E-06	1,45E-06	1,03E-06	1,09E-06	1,09E-06	1,07E-06	9,42E-07	8,69E-07
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P. C. I.	1,69E+02	1,57E+02	1,50E+02	1,79E+02	1,85E+02	1,69E+02	1,47E+02	1,07E+02
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	6,34E-08	5,91E-08	3,79E-08	6,21E-08	6,00E-08	7,22E-08	5,23E-08	5,37E-08
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	9,98E-07	7,71E-07	8,12E-07	1,02E-06	9,66E-07	1,05E-06	8,37E-07	8,64E-07
Matéria particulada (PM)	kg PM2.5 eq	5,78E-03	5,54E-03	4,39E-03	8,10E-03	1,08E-02	8,65E-03	5,07E-03	4,02E-03
Uso do solo (LU)	kg C deficit	1,71E+01	1,59E+01	1,32E+01	1,36E+01	1,77E+01	1,28E+01	1,65E+01	1,65E+01
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	1,48E-02	1,19E-02	1,04E-02	3,11E-02	2,96E-02	3,03E-02	2,49E-02	1,75E-02
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	7,10E+00	3,62E+00	4,36E+00	3,66E+00	5,51E+00	4,88E+00	4,32E+00	2,90E+00
Acidificação (A+)	molc H+ eq	4,56E-02	5,05E-02	3,11E-02	5,58E-02	5,07E-02	4,86E-02	4,83E-02	1,61E-02
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	2,97E-02	3,64E-02	2,14E-02	4,50E-02	3,89E-02	4,07E-02	3,42E-02	1,59E-02

## Desempenho ambiental de produtos no sector cerâmico em Portugal

Tabela A. 20 – Impacte potencial associado a 1 kg de revestimento cerâmico do berço ao portão

Categoria de impacte	Unidade	RC1	RC2	VC3	RP4	RP5	RP6	RP7	RP8
Aquecimento global (GWP)	kg CO <sub>2</sub> eq	7,30E-01	6,67E-01	5,93E-01	7,71E-01	7,81E-01	8,04E-01	7,44E-01	7,22E-01
Acidificação (AP)	kg SO <sub>2</sub> eq	2,28E-03	2,65E-03	1,85E-03	2,69E-03	2,77E-03	2,65E-03	2,87E-03	2,41E-03
Eutrofização (EP)	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> eq	2,07E-04	2,35E-04	1,98E-04	3,47E-04	3,49E-04	3,20E-04	2,95E-04	3,08E-04
Oxidação fotoquímica (POCP)	kg eteno eq	1,14E-04	1,28E-04	1,03E-04	1,51E-04	1,52E-04	1,47E-04	1,43E-04	1,48E-04
Depleção da camada de ozono (ODP)	kg CFC 11 eq	9,59E-08	9,13E-08	8,91E-08	9,37E-08	9,89E-08	9,75E-08	9,07E-08	8,60E-08
Depleção de recursos abióticos - elementos (ADe)	kg Sb eq	1,48E-07	8,82E-08	6,17E-08	6,62E-08	6,79E-08	7,21E-08	6,83E-08	8,05E-08
Depleção de recursos abióticos – fósseis (ADf)	MJ, P. C. I.	1,01E+01	9,54E+00	9,00E+00	1,09E+01	1,15E+01	1,13E+01	1,07E+01	9,90E+00
Toxicidade humana, efeito cancerígeno (HTc)	CTUh	3,77E-09	3,60E-09	2,27E-09	3,77E-09	3,72E-09	4,84E-09	3,79E-09	4,97E-09
Toxicidade humana, efeito não-cancerígeno (HTnc)	CTUh	5,94E-08	4,70E-08	4,86E-08	6,20E-08	6,00E-08	7,08E-08	6,06E-08	8,00E-08
Matéria particulada (PM)	kg PM2.5 eq	3,44E-04	3,38E-04	2,63E-04	4,91E-04	6,69E-04	5,80E-04	3,68E-04	3,72E-04
Uso do solo (LU)	kg C deficit	1,02E+00	9,71E-01	7,91E-01	8,23E-01	1,10E+00	8,56E-01	1,20E+00	1,53E+00
Depleção de recursos - água (WD)	m <sup>3</sup> water eq	8,83E-04	7,25E-04	6,22E-04	1,88E-03	1,84E-03	2,03E-03	1,80E-03	1,62E-03
Ecotoxicidade (ET)	CTUh	4,23E-01	2,20E-01	2,61E-01	2,22E-01	3,42E-01	3,28E-01	3,13E-01	2,69E-01
Acidificação (A+)	molc H+ eq	2,71E-03	3,07E-03	1,86E-03	3,38E-03	3,15E-03	3,26E-03	3,50E-03	1,49E-03
Formação de ozono fotoquímico (POCP +)	kg COVNM eq	1,77E-03	2,22E-03	1,28E-03	2,73E-03	2,41E-03	2,73E-03	2,48E-03	1,47E-03